

ЭРИК РОДЖЕРС

ФИЗИКА

для любознательных

**НАУКА
О ЗЕМЛЕ
И ВСЕЛЕННОЙ
МОЛЕКУЛЫ
И ЭНЕРГИЯ**





ИЗДАТЕЛЬСТВО
«МИР»

PHYSICS
FOR THE INQUIRING
MIND

THE METHODS, NATURE AND
PHYLOSOPHY
OF PHYSICAL SCIENCE

by
ERIC M. ROGERS

1966

PRINCETON, NEW JERSEY
PRINCETON UNIVERSITY PRESS

Эрик Роджерс

ФИЗИКА
ДЛЯ
ЛЮБОЗНАТЕЛЬНЫХ

ТОМ 2

НАУКА О ЗЕМЛЕ И ВСЕЛЕННОЙ.
МОЛЕКУЛЫ И ЭНЕРГИЯ

Перевод с восьмого американского издания

под редакцией

Е. М. ЛЕЙКИНА

Общая редакция

академика

Л. А. АРЦИМОВИЧА

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»

МОСКВА 1970

УДК 530.1

**Перевод с английского
М. Н. ФЛЕРОВОЙ и А. В. ЕФРЕМОВА**

Редакция литературы по физике

Инд. 2-3-1

70

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

НАУКА О ЗЕМЛЕ И ВСЕЛЕННОЙ • ВОЗНИКНОВЕНИЕ НАУЧНЫХ ТЕОРИЙ

Астрономия — это часть физики. Однако здесь мы будем рассматривать ее с иной точки зрения. Мы включили астрономию в нашу книгу с более важной целью — дать *пример возникновения и использования научной ТЕОРИИ*. Поэтому эта часть книги посвящена истории развития наших знаний о Солнечной системе — Солнце, Луне, Земле и планетах — начиная с первых наблюдений и наивных догадок до грандиозного успеха ньютоновской теории всемирного тяготения. Исторический анализ дает более ясное понимание существа теории, нежели простое ее изложение. Для знакомства с наукой очень важно глубокое понимание теории и ее взаимоотношений с экспериментом, и один из лучших примеров тому — теория всемирного тяготения, поскольку нам пужны не только результаты теории, но и прежде всего причины и пути ее возникновения.

Нам следовало бы дать читателю представление о связи между научными открытиями и социальными условиями. Однако это потребовало бы значительно более широкого и подробного рассмотрения истории астрономии. Мы же не будем давать детального изложения исторических фактов. Если фигуры некоторых великих ученых покажутся лишь одинокими маяками в безбрежном и пустынном океане, а кое-какие их высказывания — несколько односторонними, то следует помнить, что наше изложение весьма ограничено и преследует определенную цель.

«На фоне истории человеческого общества история науки обнаруживает ряд индивидуальных особенностей; объясняется это тем, что проанализировать и оценить вклад человека в ту или иную область науки значительно легче, нежели в любой другой области, за исключением искусства. Самый способный генерал не может выиграть битву без армии. А кому

следует приписать победу — ему или храбрым солдатам, которыми он командовал? Ученые выигрывают свои битвы без армий в значительной степени благодаря собственным усилиям, хотя и живут не в пустыне... . Тем не менее история науки — не просто история жизни великих ученых. Если тщательно исследовать происхождение какого-либо открытия, то оказывается, что оно подготавливалось рядом менее значительных открытий, и чем глубже проводить исследование, тем больше мы выделим таких промежуточных стадий. На первый взгляд научный прогресс похож на гигантскую лестницу, каждая ступень которой соответствует одному из великих открытий, внезапно поднимающих человечество на более высокий уровень. Но по мере углубления в анализ мы обнаружим, что большие ступени состоят из более мелких, а эти в свою очередь из еще меньших, пока, наконец, не покажется, что ступени должны исчезнуть совсем... , однако этого никогда не произойдет. Каждая победа в науке завоевывается рядом усилий, самое скромное из которых было достаточно серьезно обдуманно и взвешено».

Дж. Сартон,
«Наука и новый гуманизм», 1931 г.

«Астроном, который не верует,— безумен».

Эдвард Юнг (1700 г.)

Возникновение человека ¹⁾

Астрономия почти так же стара, как человек. Когда же появился человек и почему он стал заниматься астрономией?

Человек начал проявлять себя как разумное существо несколько сотен тысяч лет тому назад, о чем свидетельствуют наскальные рисунки в пещерах, исследованные еще очень неполно. Этих данных недостаточно, чтобы прийти к более определенным выводам, и, по мнению антропологов, прежде всего следует решить, что мы понимаем под словом Человек. Каковы основные черты, отличающие человека от животных? Решение определенных задач? Но ведь крысы, например, могут без посторонней помощи выбираться из лабиринта, а муравьи ведут настоящие сражения. Применение различных орудий? Но обезьяны часто пользуются палками и камнями, а некоторые даже строят примитивные хижины на деревьях. Забота о будущем? Пожалуй, наиболее отчетливое отличие человека от животного появляется именно тогда, когда человек начинает изготавливать орудия для использования их в будущем. Такая работа *для будущего* содержит в себе простую форму рассуждения: *если... то...* Человек делает стрелы для охоты на дичь, которую *может* встретить, роет могилы для умерших, веря, что им предстоит загробная жизнь. Заботы о пополнении запасов пищи и постройке жилища могут при наличии речи привести к более обширным планам... совместной жизни... традициям ... законам ...

Таким образом, человек начинает проявлять себя как планирующее и рассуждающее существо, беспокоящееся о будущем.

¹⁾ Некоторые комментарии в этой главе заимствованы из превосходной популярной книги о первобытном человеке: V. Gordon Child, *Man Makes Himself*, New York, 1951.

Он пытается приспособиться к изменяющимся условиям окружающей среды, меняет предметы своего обихода применительно к погоде, для защиты от нападений, наводнений, голода. Он совершенствует орудия труда, одежду, условия жизни, продукты питания и прочее, чтобы противостоять каждому новому изменению среды. Это давало ему значительно более высокие шансы выжить.

Каков возраст человечества? Быть может уже миллион лет назад первобытный человек, умеющий создавать орудия труда, в некоторых отношениях отличался от своих обезьяноподобных «собратьев». Примерно 200 000 лет назад существовал примитивный неандерталец, которого затем вытеснили наши более способные предки. Его основным занятием была охота, он владел лишь грубыми орудиями, но уже умел пользоваться огнем и заботливо хоронил умерших. Существует очень мало указаний на то, какими были наши прямые предки более 100 000 лет назад¹⁾, когда люди пользовались каменными орудиями. В течение следующих 80 000 лет каменные орудия совершенствовались, появились изделия из кости с резьбой и рисунками; но люди по-прежнему были дикарями и жили небольшими группами. Художники каменного века изготавливали маленькие статуэтки, символизирующие плодородие, и рисовали на стенах пещер животных. Некоторые из дошедших до нас фигурок и изображений представляют собой истинные произведения искусства.

Лишь 12 000 лет назад началась эпоха земледелия. Наступил новый период в жизни человека — агрономия дополнила случайные урожаи, охота на диких животных стала уступать место приручению и разведению скота, его выгону на пастбища; люди начали пользоваться гончарными изделиями для приготовления пищи, возникло производство продуктов питания, простые ремесла.

Вслед за этим, за пять или шесть тысяч лет до нас началась новая эра: отдельные селения стали объединяться в государства, появились различия в жизни города и деревни, возникла цивилизация. Люди строили большие города, в которых развивались вторичные отрасли индустрии, снабжаемые организованным сельским хозяйством и обогащаемые торговлей. На смену каменным орудиям пришли изделия из металла: меди, бронзы, железа. Для

¹⁾ Этот период времени верен лишь с точностью до множителя 2. Даже если он справедлив в отношении развития человека в одной области земного шара, то может быть неверен для других областей.

решения задач, связанных со строительством, развитием ремесел и торговли, с вопросами управления, потребовались знания арифметики, геометрии, измерения веса, длины, площади, объема, времени. Снабжающее города сельское хозяйство нуждалось в календаре для своевременной посадки растений, ухода за животными и использования разливов для орошения земель. Длительные перевозки товаров по морю и суше потребовали компаса. В эпоху ранней цивилизации компас, часы и календарь были столь же необходимы, как и сейчас. *Все это дала людям астрономия.*

Развитие человека

Три тысячи лет назад на Земле уже существовали цивилизации. Благодаря систематическим наблюдениям за Солнцем, Луной и звездами были созданы часы, календарь и компас. Пока человек был лишь добытчиком пищи, для него Солнце, Луна и звезды служили не более чем грубым ориентиром. Астрономия как наука складывалась на протяжении десятка тысяч лет. Если этот срок покажется вам слишком долгим, выразите его в количестве поколений; от дикаря с примитивным мышлением до цивилизованного человека, владеющего астрономией, прошло четыреста поколений, а до современного уровня знаний — еще сто двадцать поколений. Таков быстрый процесс покорения природы и интеллектуального развития человечества.

Возникновение астрономии

Самые первые сведения о небесных явлениях накапливались медленно. В течение столетий первобытный человек наблюдал звезды, принимал Солнце как нечто непреложное, полагался на лунный свет во время охоты и даже отсчитывал время по лунным месяцам. Солнце служило ему грубыми часами днем, звезды — ночью¹⁾, восход Солнца определял восток, заход — запад; наибольшая высота Солнца (полдень) в течение всего года неизменно указывала юг, а ночью Полярная звезда — север.

При смене времен года ежедневный путь Солнца изменяется: зимой путь Солнца над горизонтом ниже, чем летом, место вос-

¹⁾ Опытный турист может определить время по звездам с точностью до $\frac{1}{4}$ часа.

хода Солнца также смещается по линии горизонта. Таким образом, по траектории Солнца можно было составить календарь времен года, как по расположению звезд на ночном небе, так как оно меняется каждую ночь в течение всего года.

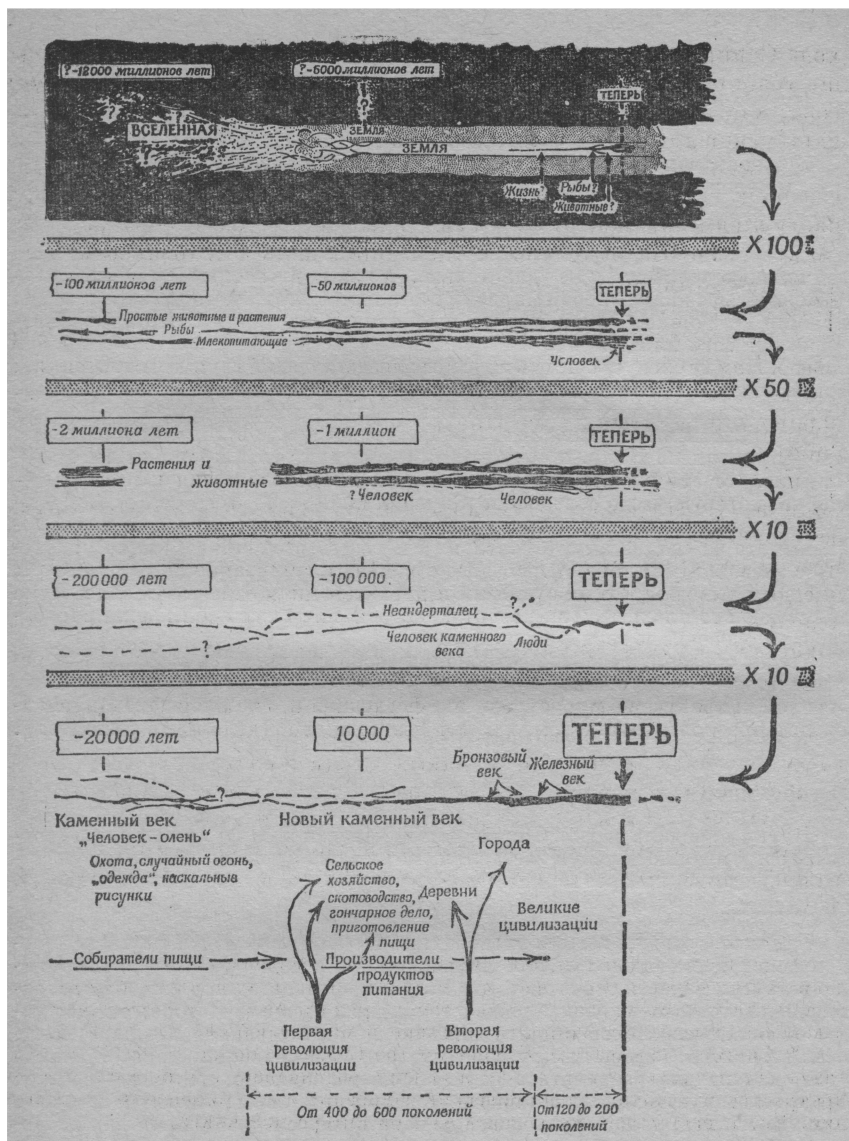
По мере развития земледелия и скотоводства календарь играл все более важную роль. Необходимо было уметь предсказывать наступление времен года, чтобы подготовить почву и вовремя посадить зерновые культуры. Овцы, прирученные человеком одними из первых, приносят ягнят в определенный сезон, поэтому первобытным пастухам тоже нужен был календарь. Создание примитивного календаря сейчас кажется нам делом несложным, но в древние времена это было настоящим искусством. Обычно календари составляли священнослужители, которых уважали и даже освобождали от тяжелой работы — ухода за скотом и полевых работ.

По мере развития городской цивилизации сведения о движении Солнца, Луны и звезд собирались и записывались со все возрастающей точностью. Эти наблюдения систематизировались и с их помощью делались прогнозы. Так, уровень воды в реке Нил поднимается в определенные времена года; очень важно не только для земледелия, но и из соображений безопасности прогнозировать наводнения. Судьба рыбаков и мореплавателей зависит от прихоти океана, его приливов и отливов, поэтому закономерности в этих явлениях и зависимость их от фазы лунного месяца тщательно отмечались. Для городов время также играло важную роль — часы и календари были необходимы для торговли и путешествий¹⁾.

Измерение времени способствовало интеллектуальному развитию. «Отсчитывая время по положению тени и учась пользоваться звездными часами, человек стал применять геометрию. Он научился определять свое положение в мировом пространстве и на Земле»²⁾.

¹⁾ Во времена древних цивилизаций не было надежных часов, существовали лишь песочные часы, лампы и водяные часы. Точное время определяли по Солнцу и звездам. Маятниковые часы и ручные часы — изобретение средневековья, отвечавшее запросам торговли и мореплавания.

²⁾ Lancelot H o g b e n, *Science for the Citizen*, London, 1938. В первых главах автор говорит о том, как и почему развивалась астрономия, и дает прекрасное описание астрономических измерений и их применения в навигации. Часть настоящей главы взята из этой интересной книги.



Фиг. 1. Грубая схема развития человечества.

«Возраст Вселенной» не только представляется фантастической догадкой, но всецело зависит от нашего выбора шкалы времени; астрофизики все еще обсуждают этот вопрос.

Астрономия и религия

Почему в древности люди придавали значение астрономии не только с практической точки зрения и почему вокруг Солнца, Луны, планет и звезд создавались различные мифы и суеверия?

В жизни человека ослепительно сверкающее Солнце играло огромную роль, и человек начал понимать это, как только стал задумываться над тем, что его окружает. Солнце давало свет и тепло людям, животным и посевам. Луна же служила источником света для охотников, влюбленных, путешественников, воинов. Эти огромные светильники казались тесно связанными со всей жизнью человека, и не удивительно, что за ними наблюдали и им поклонялись. Звезды являли собой мириады светильников меньшего размера и также служили источником удивления и поклонения. Люди воображали, что их передвигают боги или демоны, и наделяли звезды способностью творить добро или зло. Нам не следует считать подобные представления глупыми суевериями; ведь Солнце приносило долгожданное лето, а Луна давала полезный свет. Поэтому наивному уму представлялось вполне возможным просить Солнце и Луну приносить и другие дары. Яркая звезда Сириус восходила на рассвете, во время разливов Нила, и если египтяне считали, что Сириус вызывает наводнение, то это вполне пророчески. Смешение следствия и причины — ошибка, которую часто совершают и в наши дни.

Когда выяснилось, что яркие небесные тела как бы блуждают среди остальных, то за «планетами» (буквальный перевод «странники») стали наблюдать с тревожным интересом. Позднее в ранней цивилизации люди пришли к суеверным выводам, что их судьбами и характерами управляют Солнце, Луна и блуждающие планеты. Так развитию астрономических наблюдений способствовали суеверие и вера в волшебство.

Таким образом, развитие астрономии тесно переплелось с развитием религии; впрочем, и до сих пор они довольно тесно связаны, так как современная астрономия трактует о происхождении Вселенной и о ее будущем. Ниже изложены предположения о том, какими были ранние стадии этого развития ¹⁾.

Наука, магия и религия

Науку породила магия. Первобытный человек жил во власти сил природы. Его примитивный разум заставлял смотреть на природу, как на могущественное существо, которое можно в чем-то убедить. Он пытался вызвать дождь,

¹⁾ Такие догадки весьма рискованны. Несчастье молодой науки о доисторических временах в том, что неспециалисты и даже ученые (но работающие в других областях) считают, что могут строить догадки о том, как развивался первобытный человек, и даже о том, как он мыслил. (История очень страдает от таких любителей строить догадки. Почти все здание Познания построено на них.) Но здесь нам нужно составить себе правильное представление о том, как начала развиваться наука. Можете, конечно, построить на этот счет собственную теорию, а можете обратиться к первым главам «Очерков истории» Уэллса, на которых основаны некоторые из приведенных здесь соображений. В книге Уэллса, которую часто критикуют за фактические неточности и ошибочность некоторых высказываний, читатель найдет то, что специалистам-историкам не удастся ему дать — связное, хотя и несколько рискованное, изложение истории.

прыгая и квакая, подражая лягушке, он старался добиться успеха в охоте, рисую на стенах пещер животных, он зарывал умерших вблизи очага, надеясь согреть их и вернуть им жизнь, и клал возле могил орудия и пищу, которые могут им понадобиться в загробной жизни. Он проводил своего рода научные эксперименты, в основе которых лежали примитивные рассуждения. И не его вина, если представления его были ошибочными. Современный человек не верит колдунам, ибо они не могут извлечь выводов из своих наблюдений — основной недостаток суеверия, упорной слепой веры. Первобытный человек не был способен разумно рассуждать и не мог правильно относиться к суевериям и предрассудкам.

Соблюдая ритуалы и поклоняясь магическим изображениям, человек пропитался верой в могущество духов; он верил, что существуют добрые божества, которые могут ему помочь, и злые демоны, которые приносят несчастья, верил в существование могущественных богов, которые управляют его судьбой. Точно ребенок, он пытался умиротворить богов, просил, чтобы они обеспечили ему хорошую погоду, здоровье, удачную охоту. Впоследствии первоначальные причины и цели были забыты, а обряды продолжали выполняться по привычке.

Важным фактором в развитии человеческого общества явилась речь. Заговорив, человек создал основы собственного мышления. Иные существа тоже могут общаться между собой — пчелы танцами передают друг другу сведения о наличии меда; лаем собаки выражают злобу, жалобу, радость. Речь открыла перед человеком огромные интеллектуальные возможности. В ходе длительного развития речь не только позволила человеку обмениваться информацией, но дала возможность накопить эту информацию и передать ее последующим поколениям. Затем речь поднялась на более высокий уровень — появились слова, выражающие *абстрактные представления*. Таким образом, речь открыла человеку новую область *идей и рассуждений*. Конечно, прогресс этот произошел не сразу. Словесная форма мышления вначале была нечеткой и бессвязной, рассуждения не доводились до конца, слова для описания тех или иных предметов были ошибочными, похожими на нынешний детский лепет.

С возникновением разговорной речи начала развиваться религия, стали вырабатываться правила поведения отдельных личностей и общества в целом. Даже еще до развития речи в семейном укладе человек получал понятие повиновения, а с помощью разговорной речи из поколения в поколение стали передаваться такие традиции, как, скажем, уважение к родителям и др. По мере того как семейства объединялись в роды... деревни... племена..., традиции превращались в законы и обычаи во имя общего блага. На основе таких традиций, из стремления избежать несчастья и во имя успеха возникло чувство необходимости объединяться в общины, возникла *религия*.

Первобытная религия переплетается с мифами о богах, с религиозными обрядами, с попытками привести в систему окружающую человека природу и развивающиеся социальные отношения. В создании религии астрономия играла важную роль. Своего рода первыми профессиональными астрономами были священники (мудрейшие люди деревни или племени) — составители календаря. Их преемником явилось могущественное духовенство первых городских цивилизаций. Так, в древнем Вавилоне священники были банкирами, врачами, учеными, правителями — они стояли во главе государства. Накопленные ими знания легли в основу многих наук. Накопленная в течение многих лет информация дошла до нас впоследствии в виде библейских текстов. Но было ли это *наукой*?

Наука — искусство понимать природу

Любознательность и стремление накапливать знания были свойственны людям с самых древних времен. Первобытный человек копил и использовал знания — таково было начало прикладной науки. Затем он начал систематизировать знания, применять их и размышлять над ними. Это трудный шаг — от отдельных примеров к обобщениям. Понаблюдайте, как это пытается делать ребенок. Трудно уловить идею общего поведения, закона или абстрактного качества. Однако это существенный шаг в превращении набора тех или иных фактов в раздел науки. В нашем современном понимании наука никогда не являлась просто скоплением информации. Сами ученые, начиная, пожалуй, с раннего духовенства, были не просто собирателями, коллекционерами знаний. Они рылись в фактах, чтобы достичь более глубокого понимания, пытались извлечь общие идеи из наблюдаемых ими событий.

Ученые стремились *узнать*, что произошло и *как* произошло, и в течение многих веков размышляли над тем, *почему* произошли те или иные события. Эта тяга к познанию имела существенное значение для того, чтобы человек мог выжить; поколение, по-детски не желающее ничего понимать и ничего выяснять, вряд ли может существовать. Стремление к приобретению знаний могло возникнуть по необходимости, диктуемое страхом; оно могло быть рождено желанием заменить своенравных богов заслуживающей доверия властью. Но был и другой фактор: *интеллектуальное наслаждение* природой, наслаждение пониманием того, что происходит, наслаждение, получаемое от создания науки. Это наслаждение могло родиться в те далекие времена, когда первобытные люди рассказывали своим детям об окружающем мире, о природе, о богах, когда люди каменного века, которые с большим вниманием наблюдали за животными, создавали свои рисунки на камне и, по-видимому, наслаждались своим искусством.

Подобное удивление и восхищение характерно для каждого века, когда ученые создавали науку *как искусство понимать природу*.

Ученые прошли длинный путь — от страха перед своенравными богами до создания упорядоченных правил, но всегда их увлекало чувство любознательности и восхищения перед достигнутыми результатами.

Страх и беспокойство, удивление и восхищение — два аспекта главной движущей силы науки и религии. Две тысячи лет назад Лукреций считал, что «наука освобождает человека от страха

перед богами». Уолт Уитмен сокрушался о многочисленных заботах человека и в то же время радовался тому удовлетворению, которое испытывает ученый:

«Я верю, что листик травы не меньше поденщины звезд,
И что не хуже их муравей, и песчинка, и яйцо королька,
И что древесная жаба — шедевр, выше которого нет,
И что ежевика достойна быть украшением небесных гостиных,
И что малейший сустав моих пальцев посрамляет всякую машину,
И что корова, понуро жующая жвачку, превосходит любую статую,
И что мышь — это чудо, которое может одно сразить секстильоны неверных,
И я могу каждый день в течение всей своей жизни смотреть на дочку фермера,
Которая кипятит свой железный чайник и печет песочное печенье.
.
Я думаю, я мог бы жить с животными, они так спокойны и замкнуты в себе,
Я стою и смотрю на них долго-долго.
Они не скорбят, не жалуются на свой злополучный удел,
Они не плачут бессонными ночами о своих грехах,
Они не изводят меня, обсуждая свой долг перед богом,
Разочарованных нет между ними, нет одержимых бессмысленной страстью к стяжанию,
Никто ни перед кем не преклоняет коленей, не чтит подобных себе, тех, что жили за тысячу лет,
И нет между ними почтенных, и нет на целой земле горемык».

Уолт Уитмен,
«Листья травы»¹⁾

¹⁾ Перевод К. И. Чуковского.

«Строить предположения, не располагая фактами, — все равно, что пытаться войти в дом без ключа, бессмысленно блуждая вокруг, оцупывая стены и заглядывая время от времени в окна. Факты — необходимый ключ».

Юлиан Хаксли, «Очерки популярной науки».

Факты

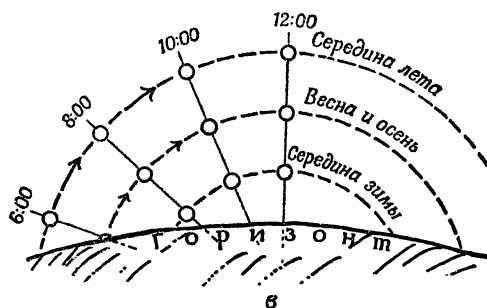
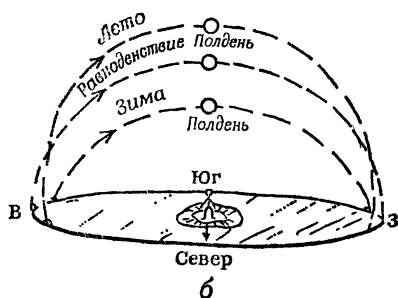
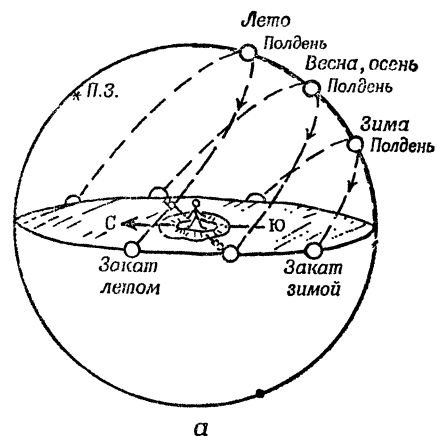
Прежде чем показать, как складывалась астрономия, мы расскажем о том, какие сведения можно почерпнуть, созерцая небо. Если вы жили за городом, на лоне природы, то почти все эти сведения вам известны. Если же вы выросли в городе, то предмет разговора будет казаться вам, наверно, бессвязным нагромождением фактов до тех пор, пока вы не взглянете на небо. Сейчас как раз наступил момент, когда это следует сделать.

Солнце — указатель

Каждый день Солнце подымается от горизонта на востоке, описывает дугу, достигая максимальной высоты в полдень на юге, затем опускается к горизонту на западе. Оно слишком яркое и за ним трудно наблюдать. Но оно заставляет предметы, например вертикальный столб, отбрасывать четкую тень. В полдень, в середине дня, между восходом и закатом, тень от Солнца короче всего и в любой день года она указывает одно и то же направление — на север. Положение полуденного Солнца на небе совпадает с вертикальной «меридиональной» плоскостью, проходящей с севера на юг.

Зимой тени бывают длиннее, так как Солнце движется низко над горизонтом, подымаясь на юго-востоке и садясь на юго-западе ¹⁾. Летом Солнце стоит выше, тени от него короче, а дни длиннее. Между этими крайними случаями имеются два «равноденствия»,

¹⁾ Такое описание годится для северных широт.



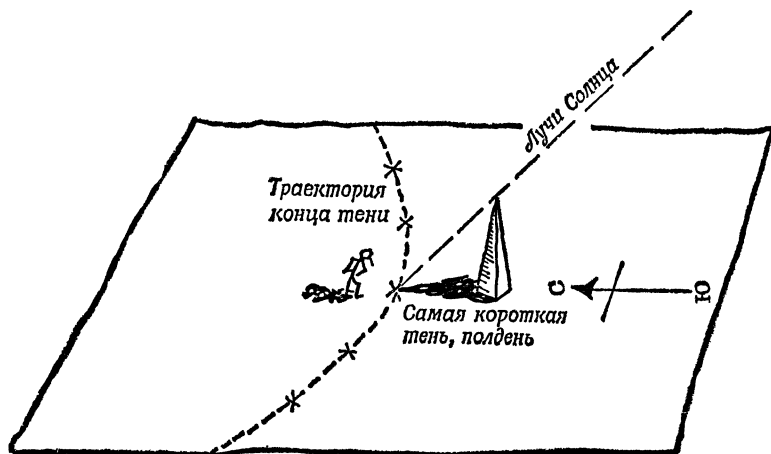
Фиг. 2. Путь Солнца по небосводу изменяется в зависимости от времени года.

когда дни и ночи одинаковы, а Солнце встает точно на востоке и садится точно на западе.

По представлениям первобытного человека восход Солнца указывал на горизонте — границе плоской Земли — восток, а место восхода — время года. В календаре использовалась и длина полуденных теней. Тень от столба служила грубыми часами. Хотя эти часы правильно указывали полдень, положение других моментов времени менялось в зависимости от времен года. Наконец чья-то гениальная догадка о том, что столб следует ориентировать параллельно земной оси (т. е. наклонить его под углом, соответствующим широте места), помогла создать точные солнечные часы.

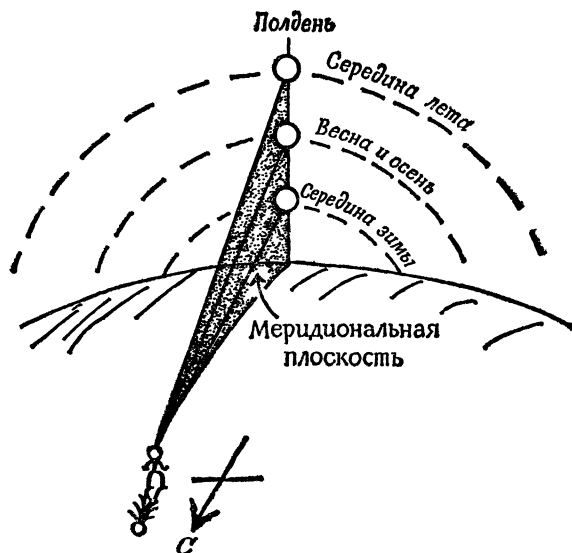
Звезды

Звездное небо ночью являет нам извечную картину, усыпанную определенными группами звезд (созвездия), которым люди в древности давали фантастические названия. Вся звездная картина непрерывно вращается по небосводу, как если бы она была вделана



Фиг. 3. Тень от столба короче всего в полдень.

в твердую раму. Одна из звезд, так называемая Полярная звезда, остается практически неподвижной, тогда как все прочие звезды вращаются вокруг нее. Понаблюдайте за звездами в течение нескольких часов и вы убедитесь в этом. Можно направить на небо



Фиг. 4. Меридиан.

Полуденное Солнце находится на юге (или на севере). Меридиональная плоскость — вертикальная плоскость, проходящая через полуденные положения Солнца.

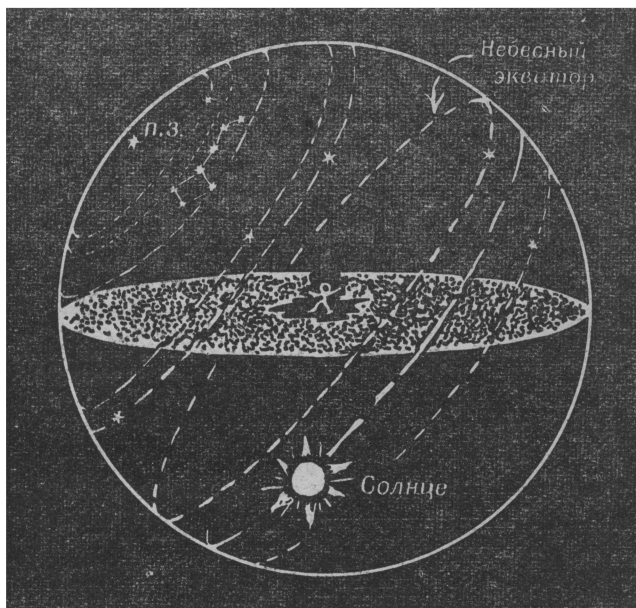
фотокамеру с открытым объективом. Тогда пленка зафиксирует это движение. Ночь за ночью, год за годом звездная картина вращается без каких-либо изменений. Эти звезды называются «неподвижными»¹⁾. Полярная звезда указывает север в меридиональной плоскости полуденного Солнца, проходящей с севера на юг. Звездная картина вращается вокруг этой звезды с абсолютно неизменной скоростью. Это движение звезд позволяло первобытному человеку определять время, а Полярная звезда служила ему проводником, указывая точно на север²⁾.

Наиболее простое «объяснение» или описательная схема звездного неба состоит в следующем — это сверкающие светила, вкрап-

¹⁾ Если бы мы жили на протяжении нескольких столетий, то заметили бы изменения в форме некоторых созвездий, так как звезды все же перемещаются.

²⁾ При смене равноденствий направление оси вращения Земли медленно описывает конус относительно звезд, так что только несколько веков назад оно указывало на некоторую яркую звезду как на Полярную (см. рисунки в последующих главах). Сейчас направление земной оси указывает на нашу теперешнюю Полярную звезду, а во времена постройки пирамид оно указывало на другую звезду. За тысячу лет до нашей эры яркой Полярной звезды не существовало, и это, возможно, задержало развитие навигации.

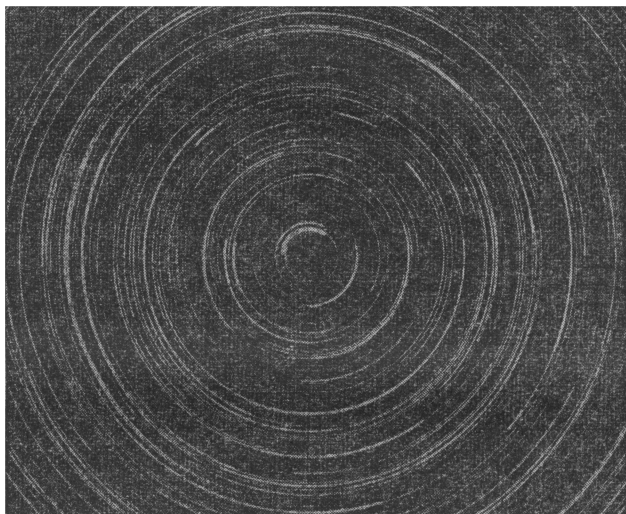
ленные в большую вращающуюся полусферу, в центре которой находимся мы. Такое представление возникло много лет назад, и если бы вы смотрели на небо в течение многих ночей, то и вам наверное показалось бы, что так на самом деле оно и есть. Мудрый мыслитель сделал предположение, что в действительности существует полная сфера, лишь половину которой мы можем, однако,



Фиг. 5. Звездная картина вращается.

видеть в данный момент времени. Небесная сфера, ось вращения которой проходит через Полярную звезду, и небесный экватор, являющийся продолжением земного, неизменно вращаются вместе со звездами, совершая полный оборот в течение 24 часов. Солнце светит слишком ярко, и поэтому днем видеть звезды невозможно, мы видим лишь те звезды, которые находятся на небесной полусфере над нами ночью, когда Солнце находится на другой полусфере. Ежедневный путь Солнца по небу близок к небесному экватору, но проходит в течение года то выше, то ниже его от $23\frac{1}{2}^{\circ}$ к северу летом до $23\frac{1}{2}^{\circ}$ к югу зимой.

Хотя звездная картина в целом остается неизменной, ее положение меняется при смене времен года — та часть звезд, которая находится в полночь прямо над нами, постепенно сдвигается к западу и ее заменяет другая; весь цикл происходит в течение года. Звезды, которые заходят через час после захода Солнца, в следующую ночь будут находиться на 1° ниже, ближе к западу, и зайдут на несколько минут раньше; через две недели они будут на одном



Фиг. 6. Фотографический снимок неба вблизи Полярной звезды.

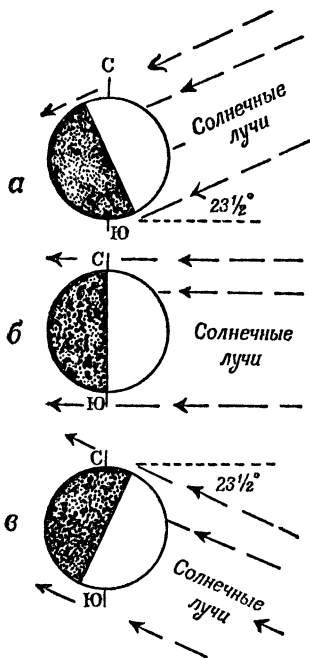
Сделан с восьмичасовой экспозицией. Полярная звезда сама оставляет очень яркий след вблизи центра снимка.

уровне с Солнцем и зайдут одновременно с ним. Таким образом, за 24 часа небесная сфера совершает немногим более одного оборота: $360^\circ + \text{около } 1^\circ$. Она движется несколько быстрее Солнца, которое совершает один оборот за 24 часа. Небесная звездная сфера совершает за год один лишний полный оборот.

Солнце и звезды

Это различие между ежедневным движением Солнца и звезд (происходящее вследствие движения Земли по ее орбите вокруг Солнца) было известно с давних времен и указывало на то, что

Солнце движется под действием других причин. Солнце как божество стало центральной фигурой многих первобытных религий; за его передвижением по небу тщательно следили, ориентируясь по изменению теней, и делали отметки, выкладывая в ряд большие камни в храмах.



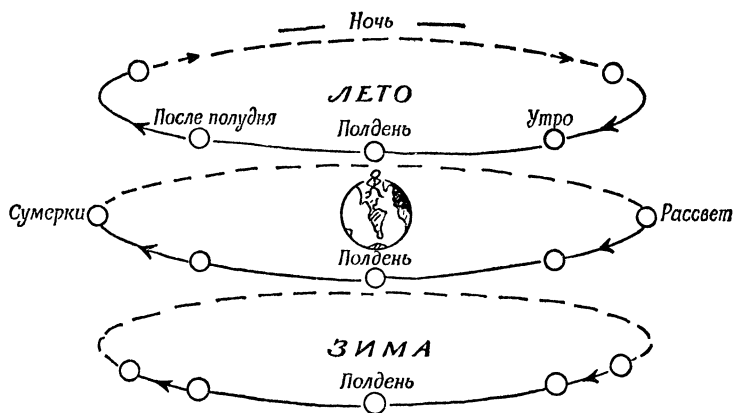
Вместо того чтобы говорить, что звездная картина «уходит вперед» (подобно часам, которые спешат) на 1° за день, мы принимаем движение звезд за стандарт и говорим, что Солнце отстает от этого стандарта на 1° в день. Мы можем «прикрепить» Солнце, подобно звездам, к внутренней поверхности небесной сферы; но поскольку Солнце отстает в своем движении от звезд, оно не остается в этом фиксированном месте звездной сферы, а будет медленно ползти назад, совершая за год полный

Фиг. 7. День и ночь в различные времена года. а — лето в Северном полушарии (длинные дни, короткие ночи); зима в Южном полушарии (короткие дни, длинные ночи); б — во время равноденствия (день и ночь повсюду равны); в — зима в Северном полушарии (короткие дни, длинные ночи); лето в Южном полушарии (длинные дни, короткие ночи).

оборот. Таким образом, движение Солнца мы можем представить состоящим из ежедневного движения вместе с небесной сферой и из ежегодного движения назад относительно звезд.

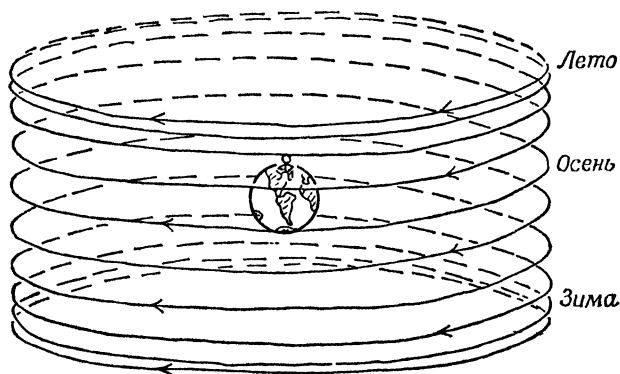
Эклиптика и зодиак

Идея отделить ежегодное движение Солнца от его ежедневного движения по звездному небу может служить примером научного анализа. Как только возникла такая идея, удалось составить карту ежегодного движения Солнца среди звезд — не непосредственно, ибо солнечный свет затмевает днем звезды, а наблюдая расположение звезд на небе в полночь. Годовой траекторией Солнца является не небесный экватор, а окружность, плоскость которой наклонена

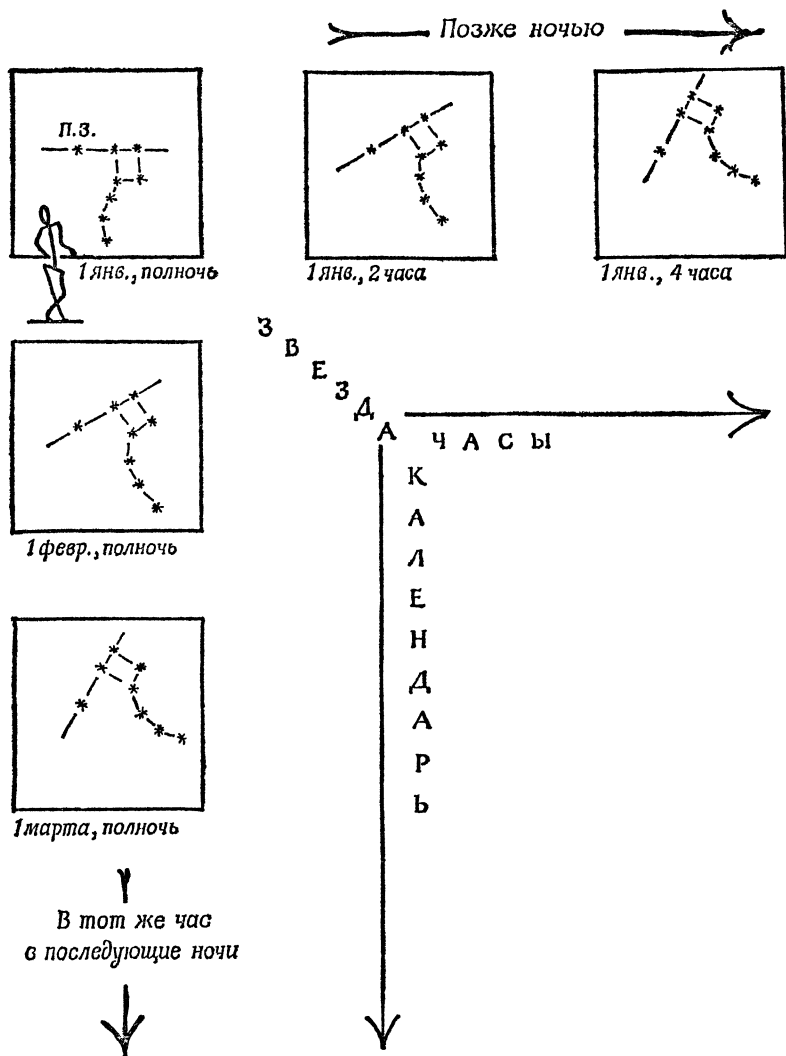


Фиг. 8. Путь Солнца.

Вид с неподвижной Земли в различные времена года. Положения Солнца указаны (полдень, утро и т. д.) для наблюдателей, находящихся на долготе Нью-Йорка. Если бы такой наблюдатель мог вести наблюдения непрерывно, независимо от положения Земли, то увидел бы, что 6 месяцев от лета до зимы Солнце движется по спирали вниз (см. фиг. 9), а затем по спирали вверх, по той же траектории, от зимы до лета.

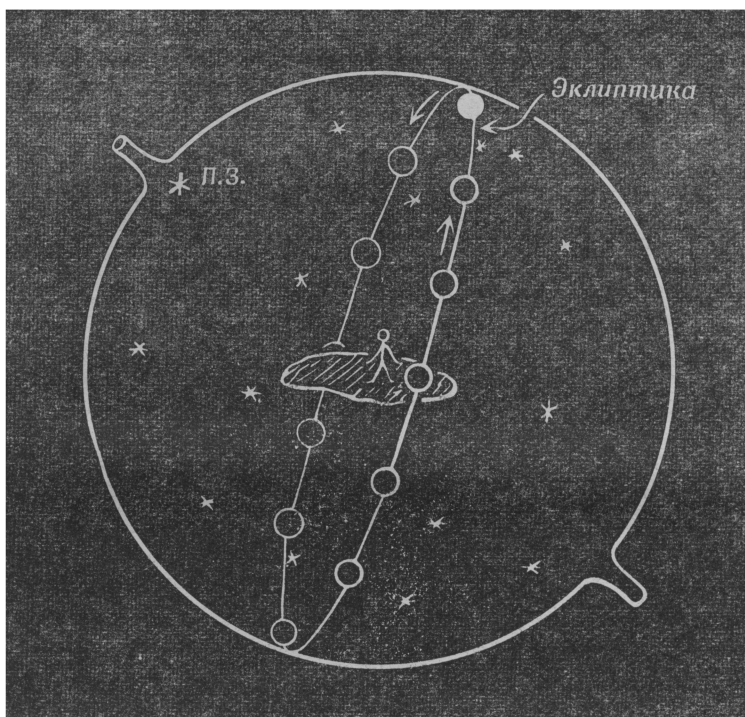


Фиг. 9. Путь Солнца в течение полугода.



Фиг. 10. Созвездия сохраняют постоянную форму, но совершают за месяц поворот на 30° относительно полуденного и полуночного положений Солнца.

по отношению к плоскости экватора на $23\frac{1}{2}^{\circ}$. Именно вследствие этого наклона *ежедневный* путь Солнца на небе меняется в зависимости от времени года. Во время равноденствий годовая траектория Солнца пересекает экватор. Летом Солнце ежедневно дви-



Фиг. 11. Эклиптика, путь Солнца на звездном небе в течение года.
Суточное движение представлено как бы «замороженным».

жется в небе по этой наклонной траектории на $23\frac{1}{2}^{\circ}$ выше, а зимой — на $23\frac{1}{2}^{\circ}$ ниже. Эта годовая наклонная траектория называется *эклиптикой*.

При движении Солнца по эклиптике оно в течение года проходит в данное время года через одни и те же созвездия, и так повторяется из года в год. Широкая полоса созвездий в окрест-

ности эклиптики называется *зодиаком*, и этим созвездиям астрологи давно дали специальные названия, соответственно каждому месяцу года.

Луна

Луна обращается вокруг Земли и освещается солнечным светом. Понаблюдайте за ней неделю или две; обратите внимание на то, где находится в данный момент Солнце, и проверьте, как это влияет на свет Луны. Луна движется по небу вместе с соседними звездами, но даже за одну ночь она заметно отстает от звезд. Луна отстает от звезд значительно быстрее, нежели Солнце, — на 90° в неделю, а за месяц — на полный оборот вокруг всей звездной сферы. Месячная траектория Луны наклонена по отношению к эклиптике на 5° , но расположена в пределах зодиака.

Затмения

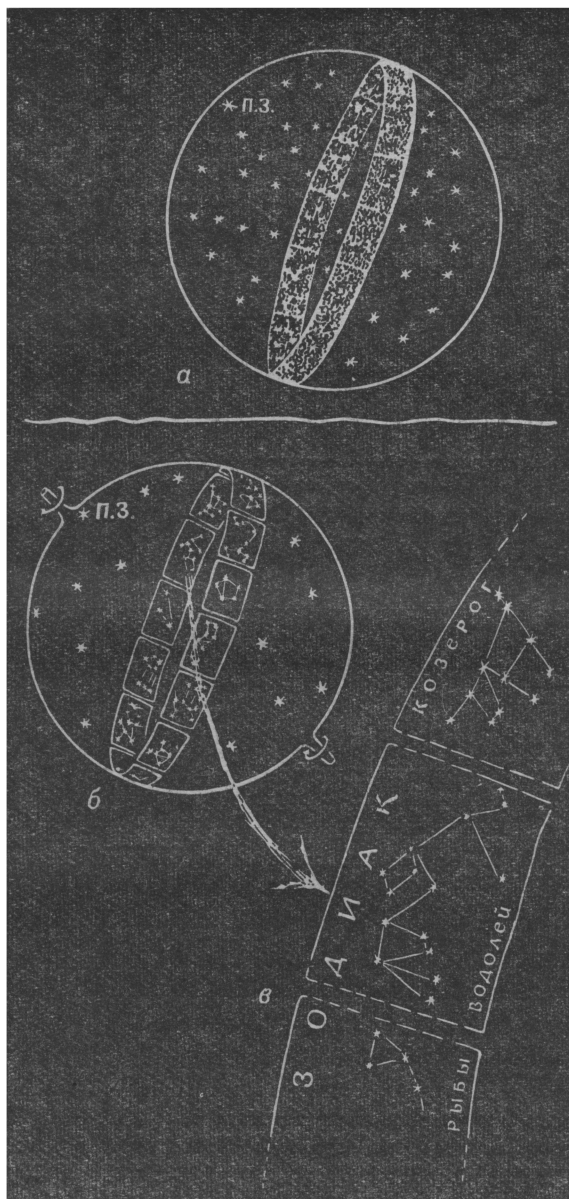
Затмения — явления весьма эффектные. Все выглядит так, будто кто-то откусил кусок от Солнца или от Луны. А полное затмение Солнца внушает страх даже культурным людям. И немудрено, ведь дневной свет меркнет и становится холоднее.

«В церковном календаре колдовство, магия и истинная наука были невообразимо перепутаны. Осуществляя якобы связь с небесными существами, священники поощряли веру в то, что природу можно подкупить, давая ей взятки, как большому начальнику. Одним из их наиболее действенных средств воздействия на суеверных людей являлась способность предсказывать затмения. Затмения толковались как неоспоримые знаки божественного нерасположения, а этого было вполне достаточно, чтобы оправдать взимание дополнительных приношений у прихожан. Никакой практической пользой, кроме укрепления престижа духовенства и его обогащения, нельзя объяснить столь большое внимание к этим явлениям»¹⁾.

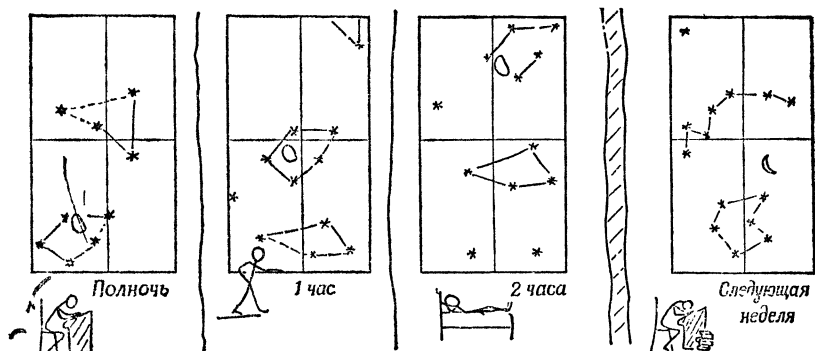
Позднее люди поняли, что затмения — лишь тени. Когда происходит затмение Луны, тень на Луну отбрасывает Земля. Затмение Солнца происходит в том случае, когда Луна находится между Землей и Солнцем, и мы попадаем в ее тень, которая быстро скользит по Земле.

Чтобы произошло затмение, Солнце, Луна и Земля должны находиться на одной прямой. И это происходит только тогда,

¹⁾ Lancelot Hogben, Science for the Citizen, London, 1938.

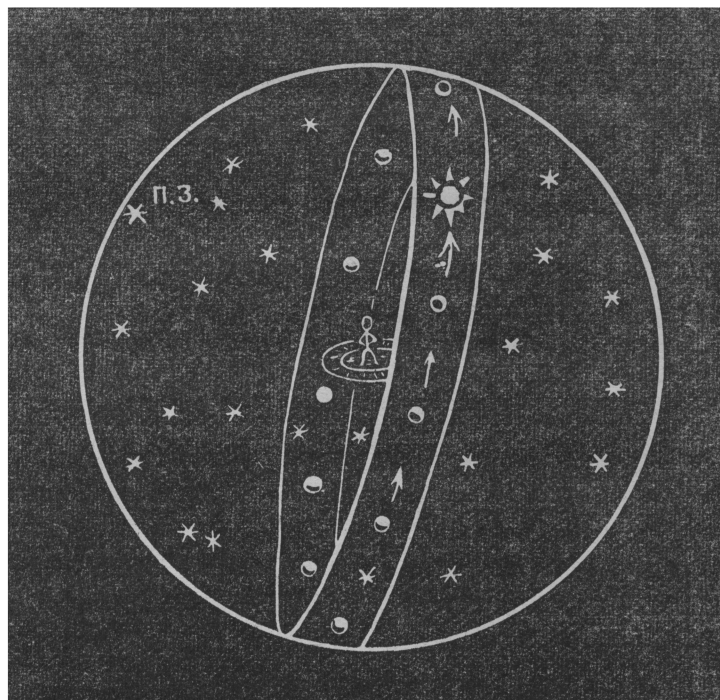


Фиг. 12. Зодиак, пояс небесной сферы, наклоненный под углом $23\frac{1}{2}^\circ$ к экватору. Ежегодный путь Солнца (эклиптика) проходит вдоль средней линии этого пояса, а траектории Луны и планет лежат внутри него. Зодиак делился на двенадцать секций, носивших имена известных групп звезд или созвездий.



Фиг. 13. Движение Луны.

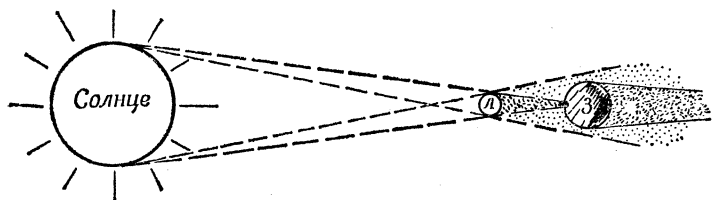
Луна на своем пути по небу вместе со звездами перемещается в обратном направлении относительно звездной картины, совершая за месяц полный оборот.



Фиг. 14. Пояс зодиака.

Положения Луны в различных фазах в течение месяца. Суточное движение небесной сферы здесь «заморожено».

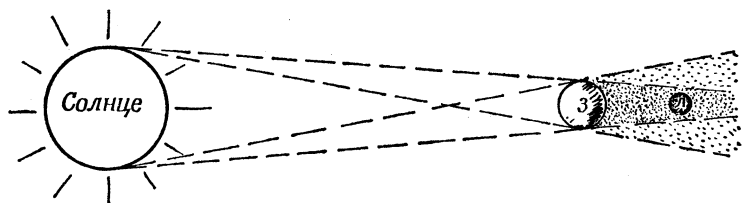
когда Луна, двигаясь по своей наклонной орбите, пересекает плоскость эклиптики, в которой по определению находятся Солнце и Земля. Но даже в этом случае необходимое выстраивание трех



Фиг. 15. Затмения Солнца.

Происходят, когда Луна проходит между Солнцем и Землей. Размеры Луны и расстояние от Земли таковы, что могут наблюдаться полные затмения.

светил на одной прямой происходит редко. Затмение Луны — это тень, падающая на Луну, и выглядит оно одинаково с любой точки Земли. Таким образом, затмение Луны, наблюдаемое с различных



Фиг. 16. Затмения Луны.

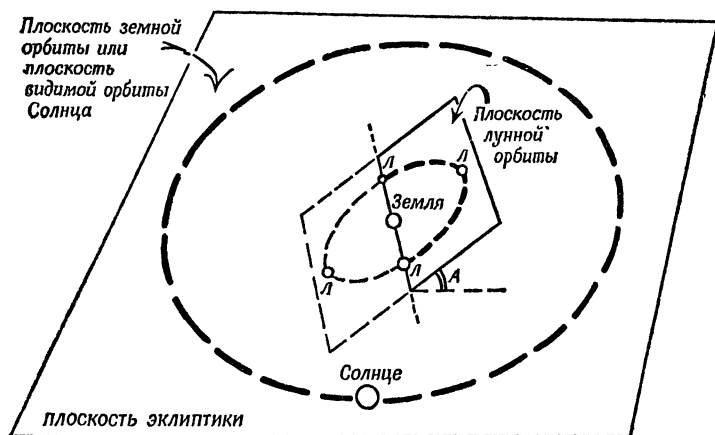
Наблюдаются, когда Луна проходит через тень, отбрасываемую Землей.

участков Земли, происходит в различные моменты времени по местным часам. И это служит доказательством того, что Земля круглая, а не плоская.

Календарь

День. Движение Солнца от полудня до полудня определяет почти постоянный день. Однако продолжительность этого дня все же несколько изменяется: полдень, отмечаемый по солнечным ча-

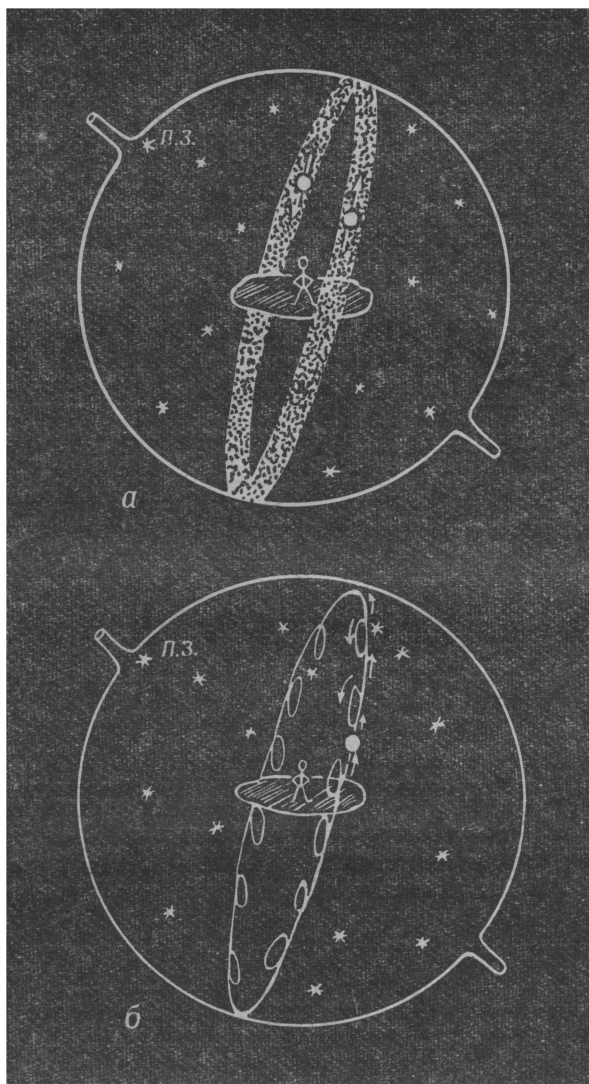
сам, в одни времена года опережает полдень, отмечаемый обычными часами, а в другие отстает от него, иногда на несколько минут. Истинное движение Солнца по эклиптике не одинаково на протяжении года — Солнце движется быстрее зимой; таким образом, в его дневном движении наблюдаются некоторые изменения. (В движении Луны наблюдаются еще более сложные нерегулярности.)



Фиг. 17. Затмения происходят только в определенные моменты времени. Угол A равен 5° . Однако линия, по которой плоскость лунной орбиты пересекает плоскость эклиптики, медленно вращается вследствие возмущений, и затмения не всегда происходят в одно и то же время земного года.

Движение звезд относительно небесной оси, проходящей через Полярную звезду, определяет постоянный, несколько более короткий день; этот день для человека служил стандартом до тех пор, пока не появились более совершенные электронные часы.

Месяц. Пожалуй, самым первым источником для составления календаря была Луна. Месяц, отсчитываемый от полнолуния до полнолуния, равен приблизительно $29\frac{1}{2}$ дням. Полная Луна находится точно напротив Солнца, так что этот месяц непосредственно связан с движением Солнца. За $29\frac{1}{2}$ дней Солнце смещается почти на 29° по эклиптике, так что Луна, чтобы догнать Солнце, совершает оборот на $(360+29)^\circ$ по отношению к звездам. Если звезды считать неподвижными, то по отношению к ним полный оборот Луны будет занимать 27,3 дня. Подобно составителям древнего календаря, мы пользуемся месяцем, равным $29\frac{1}{2}$ дня, чтобы предсказать наступление полнолуния, новолуния и т. д.; если же



Фиг. 18. Движение планеты вблизи эклиптики (в поясе зодиака).

а — общая область, в которой лежит путь планеты — пояс зодиака; **б** — при более детальном рассмотрении путь планеты имеет вид петли, т.е. представляет собой эпициклоиду.

нам надо вычислить движение Луны под действием сил тяготения, то мы пользуемся месяцем, равным 27,3 дня.

Год. Представление о годе отражает:

а) повторение времен года;

б) время, которое требуется для того, чтобы Солнце вернулось на прежнее место на звездном небосводе или чтобы звезды оказались в том же полуночном положении на небе; это представление несколько отличается от предыдущего;

в) период в 12 (или 13) лунных месяцев; легко видеть, что такой год вскоре не будет совпадать с солнечным годом (состоящим из различных времен года).

Планеты

Отдельные яркие «звезды» изменяют свое положение по отношению к Солнцу, Луне и остальным звездам столь нерегулярно, что им было дано название «планеты», что означает «странники». Планеты выглядят очень яркими звездами, самые слабые из них мерцают, и они блуждают по своим орбитам, лежащим вблизи эклиптики. Планеты следуют за движениями Солнца и Луны относительно созвездий зодиака, но с различными скоростями, и время от времени в обратном направлении. Первобытный человек, вероятно, наблюдал наиболее яркие планеты, но не мог извлечь никакой пользы из этих наблюдений. Впрочем, планеты, подобно затмениям, воздействовали на воображение суеверных людей.

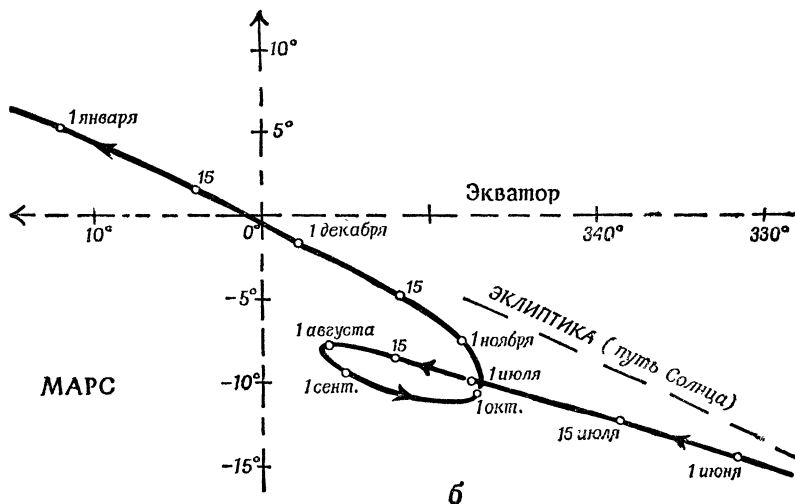
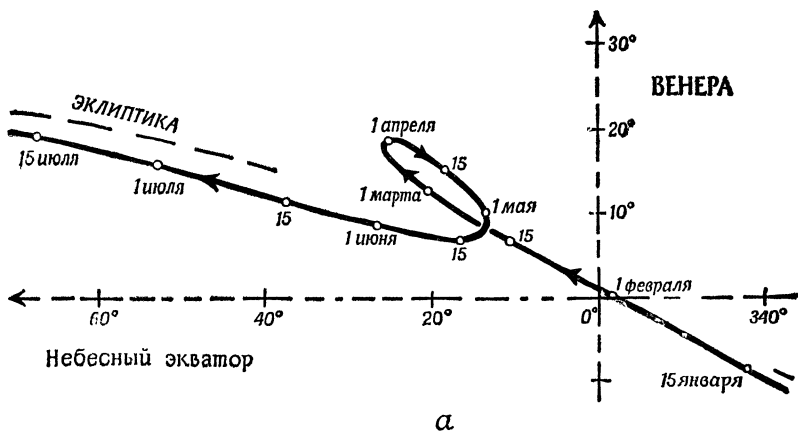
Зодиак

По зодиаку проходят годовая траектория Солнца, месячная траектория Луны и траектории всех планет. Другими словами, орбиты Земли, Луны и планет лежат почти в одной и той же плоскости. Астрологи определяли судьбу и характер человека в зависимости от того положения в зодиаке, которое в момент рождения человека занимали Солнце, Луна и планеты.

Планеты и их движение

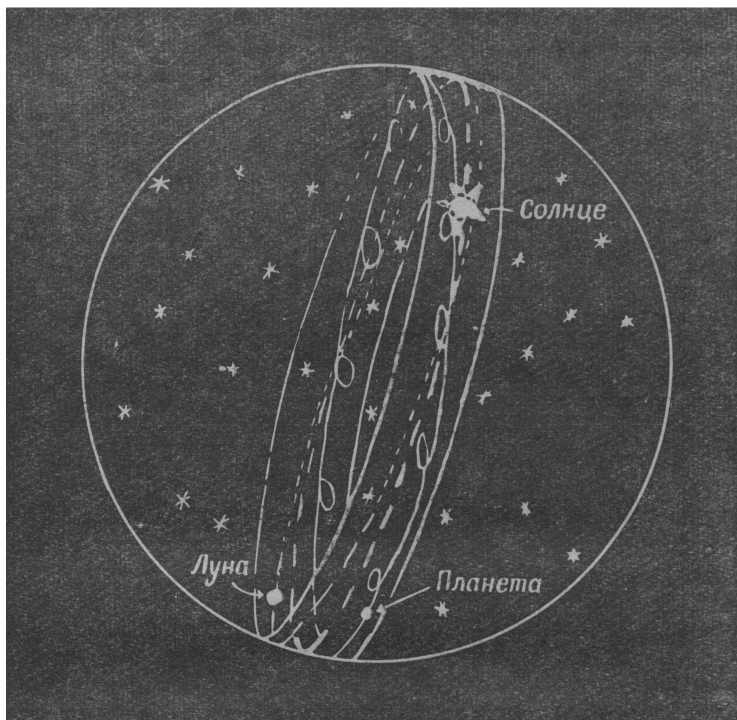
В эпоху ранних цивилизаций были известны пять «странствующих» планет, кроме Солнца и Луны, которые тоже причислялись к ним:

Меркурий и *Венера* — яркие «звезды», которые никогда не удалялись от Солнца, а двигались то впереди него, то



Фиг. 19. Пути Венеры (а) и Марса (б) на звездном небе.

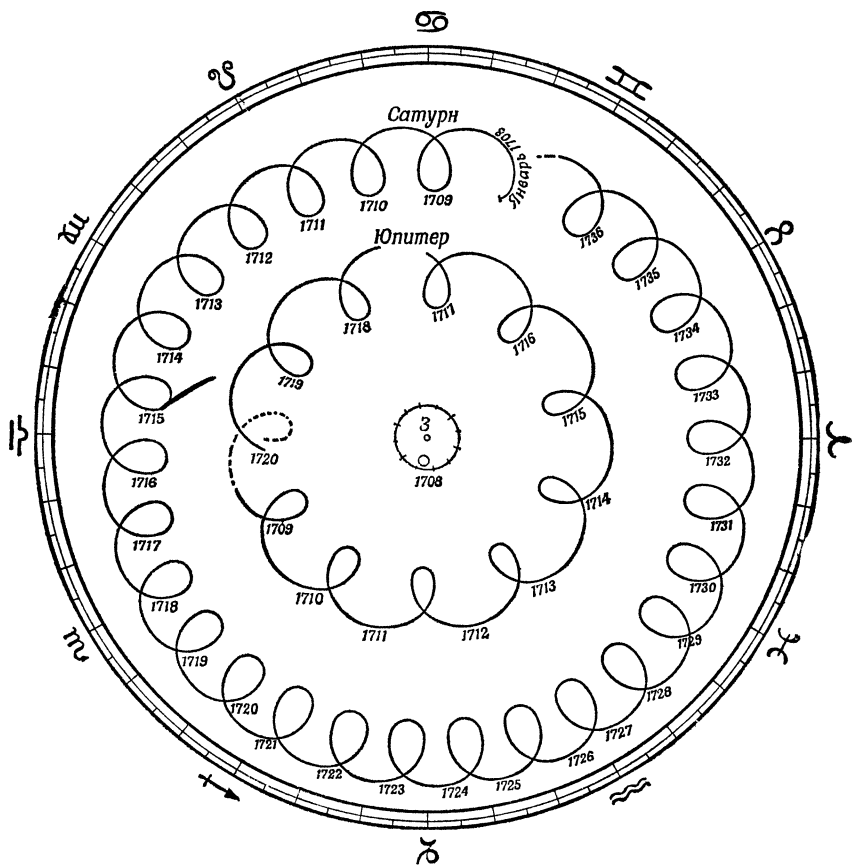
Эклиптика — это кажущийся путь Солнца. Орбиты планет проходят близко к эклиптике, потому что плоскости этих орбит близки к плоскости земной орбиты (или видимой орбиты Солнца, эклиптики).



Фиг. 20. Пояс зодиака с траекториями Солнца (в течение одного года), Луны (в течение одного месяца) и одной из планет (в течение «года» данной планеты).

Суточное движение небесной сферы здесь «заморожено».

позади него, так что их можно было видеть только на рассвете или на закате. Меркурий — небольшая планета, траектория которой проходит очень близко от Солнца и которую поэтому трудно обнаружить. Венера — большое яркое светило на вечернем или утреннем небе. Ее называли то «вечерней звездой», то «утренней звездой», древние астрономы не представляли себе, что это одно и то же светило. *Марс* — красноватая «звезда», описывающая петлеобразную траекторию относительно зодиака, причем полный оборот она совершает примерно за два года.



Фиг. 21. Кажущиеся пути Юпитера и Сатурна.

Так их видел бы наблюдатель на Земле, смотрящий на них с расстояния, далекого от Земли, так чтобы эпициклоиды были видны без кажущегося в действительности сокращения. Показана кажущаяся орбита Солнца. Земля находится в центре. Когда астроном Кассини составлял эту диаграмму в 1709 г., он пользовался размерами орбит, измеренными Коперником.

Юпитер — очень яркая «звезда», медленно движущаяся относительно эклиптики и совершающая полный оборот за 12 лет.

Сатурн — яркая «звезда», медленно движущаяся относительно эклиптики, причем ее полный оборот занимает приблизительно 30 лет.

Юпитер и Сатурн описывают на своем пути много петель, примерно по петле за земной год.

Когда одна из *внешних* планет — Марс, Юпитер или Сатурн — описывает на своем пути петлю, она движется по отношению к звездам все медленнее и медленнее к востоку, останавливается, в течение некоторого времени движется в обратном направлении к западу, снова останавливается и затем начинает двигаться опять к востоку, подобно Солнцу и Луне ¹⁾.

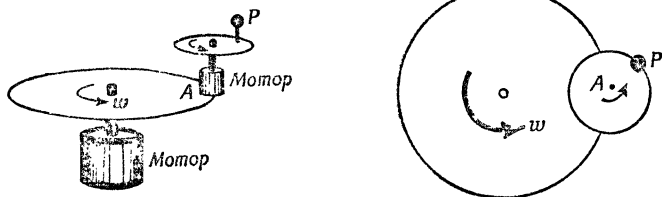
На фиг. 19 показаны петлеобразные траектории планет в звездном небе. Когда впервые были обнаружены планеты, ученых древности волновала загадка: что заставляет планеты двигаться столь необычным образом? И теперь наша главная забота — попытаться объяснить странные движения планет, которые вызывали такое удивление и породили столько суеверий. Мы рассматриваем этот вопрос, чтобы показать, как создавалась научная теория.

Эпициклоида

В наше время петлеобразная траектория планеты называется *эпициклоидой* (от греческого слова, означающего внешний круг), ибо такую траекторию можно получить, катя небольшой круг по большой окружности. На фиг. 22 приведена схема прибора, с помощью которого можно получить эпициклоиду, сходную с траекторией планеты. Большое колесо *w* вращается с постоянной скоростью вокруг неподвижной оси. В некоторой точке *A* на его ободе укреплена ось, вокруг которой может вращаться маленькое колесико. Колесико вращается с постоянной скоростью, гораздо быстрее большого колеса *w*. При этом точка *P* на ободе маленького колесика описывает эпициклоиду. Наблюдаемый путь планеты подобен этой эпициклоиде, если смотреть на планету под таким углом, как если бы все приспособление находилось на уровне глаз. (Эта модель позволяет предположить, что кажущееся движение планет состоит из двух круговых движений. Предположение это

¹⁾ Вспомним, что хотя Солнце ежедневно движется с востока на запад, совершая ежегодное движение по эклиптике, оно также смещается в обратном направлении, или с запада на восток. То же происходит и с планетами.

выглядит еще более невероятным, если учесть, что одно из этих движений представляет собой движение планеты в течение года. Однако древние астрономы не сумели понять и развить далее эту идею.)



Фиг. 22. Прибор для построения эпициклоид.

Наблюдения

Горожане в наши дни редко обращают внимание на небо, но для тех, кто оказывается ночью на улице, планеты представляются странными яркими предметами. Увидев их однажды, вы вряд ли упустите возможность поглядеть на них еще раз. Даже с помощью самого простого телескопа или бинокля можно разглядеть удивительные детали: серповидную фазу Венеры, фазы Луны, Юпитера, а может быть даже кольца Сатурна. В телескоп планеты кажутся больше, а неподвижные звезды нет. Объясняется это тем, что планеты много ближе к нам. Неподвижные звезды имеют гораздо большие размеры, чем планеты, но находятся намного дальше и поэтому выглядят точками ¹⁾.

Планеты и звезды

Теперь мы знаем, что близкие к нашей Земле планеты имеют примерно такие же размеры, как и Земля, и, подобно Земле и Луне, светятся отраженным солнечным светом (это можно установить, исследуя их свечение с помощью спектрографа; оказывается, что свечение содержит характерные линии поглощения солнеч-

¹⁾ Телескопы не могут выявить действительного размера звезд. Даже в самый мощный телескоп звезды выглядят точками, вернее маленькими кружками (на изображениях, получаемых с помощью оптических приборов, сказывается волновая природа света), причем чем крупнее телескоп, тем меньше кружок.

ного света). Между тем неподвижные звезды сами испускают свет, они раскалены добела подобно Солнцу (с помощью спектрографа мы можем узнать, как они различаются по составу и температуре).

Параллакс

Земля вращается вокруг Солнца и проходит по своей орбите 186 000 000 миль за шесть месяцев. При этом заметны некоторые изменения в расположении звезд. Раз мы совершаем столь значительное перемещение, то должны наблюдать так называемые *параллаксы*. Проведем следующий эксперимент. Будем смотреть на группу людей, стульев или каких-то других предметов с различных расстояний. Будем ходить мимо этой группы взад и вперед или вокруг нее и посмотрим, как будут изменяться относительные положения предметов в группе. Те предметы (или люди), которые находятся на заднем плане, будут казаться нам неподвижными, тогда как ближние предметы будут двигаться относительно заднего плана, причем направление их движения будет обратно направлению нашего движения. Эти параллаксы автоматически учитываются людьми при определении расстояний на глаз; современные астрономы пользуются ими, чтобы судить о расстояниях до Луны, планет и звезд.

Даже если бы звезды были все вкраплены в одну сферу при движении Земли по ее орбите, мы оказывались бы то ближе, то дальше от той или иной части небосвода, и наблюдаемая нами звездная картина искажалась бы. Древние астрономы не замечали таких изменений и пришли к выводу, что Земля должна покоиться в центре Вселенной. Другим возможным объяснением могло служить предположение, что звезды находятся на расстоянии, бесконечно большом по сравнению с диаметром земной орбиты. В настоящее время из очень точных телескопических измерений очень малых параллаксов следует, что даже ближайшие звезды находятся от нас на огромных расстояниях. С помощью значительно более простых измерений было показано, что планеты находятся в миллионы раз ближе к Земле. Если бы мы могли измерять расстояния, определяя время прохождения света от каждого небесного тела до нас, мы нашли бы, что свет доходит от Солнца до нас за 8 минут, от ближайших планет за несколько минут и от наиболее далеких — за несколько часов, тогда как путь света от ближайшей к нам звезды длится несколько лет.

Ранние ступени прогресса

Итак, древняя астрономия имела три побуждения к дальнейшему развитию:

- а) практические цели: компас, часы, календарь;
- б) магия для воздействия на психику людей; астрология для предсказания судьбы, удач и неудач; эти суеверия позднее заставляли многих правителей оказывать покровительство и поддержку астрологам;
- в) чисто научный интерес: по мере развития человечества появлялись ученые, подобные современным ученым, интерес которых к природе и стремление понять происходящие явления представляют собой движущую силу научного прогресса.

Астрономия в эпоху древних цивилизаций

Трудно установить, кто делал те или иные великие открытия, так как они, вероятно, совершались не сразу, а постепенно проходя различные стадии, и затем медленно распространялись, открывались вновь и многократно подтверждались. Поэтому сохранившиеся источники ненадежны и могут служить лишь некими вехами. Они охватывают развитие астрономии с того времени, когда она играла важную роль при сборе урожая и развитии скотоводства, до той стадии, когда она заняла надлежащее место как самостоятельная наука. Мы не даем развернутого описания истории астрономии, а ограничиваемся лишь краткими заметками.

Городские цивилизации стали развиваться в долинах нескольких больших рек 5000 или даже более лет назад. Многие «прикладные науки» были известны уже за несколько тысяч лет до этого — например, уже существовало искусственное орошение полей с помощью каналов и прудов; применялись плуги, парусные лодки, повозки на колесах; животные использовались как тягловая сила; научились получать и применять медь, кирпичи, глазурь; наконец, уже существовал солнечный календарь, письменность, система счисления; умели применять бронзу¹⁾.

Самаритяне, вавилоняне и халдеи (народности, населявшие Месопотамию)

Примерно 4000 лет назад уже существовали богатые города с обширной торговлей. Их обитатели превосходно владели коммерческой арифметикой, которая в сущности была почти алгеброй: они могли решать задачи, приводящие к квадратным и даже к ку-

¹⁾ V. Gordon Child e, *Man Makes Himself*, New York, 1951.

бическим уравнениям, знали точное значение $\sqrt{2}$, но принимали π приближенно равным 3, пользовались подобными треугольниками и знали теорему Пифагора; они могли хорошо взвешивать и измерять, имели солнечные и водяные часы. Записи и учебные тексты наносились на глиняные дощечки, которые дошли до нашего времени.

Астрономические наблюдения тех времен не являлись чудесами, за которые их часто выдавали, но служили хорошей основой для составления календарей. Вблизи экватора ежедневная траектория Солнца не дает такого четкого календаря, как на далеком севере, а наблюдать за поведением Луны гораздо легче. Поэтому вавилоняне в основу календаря полагали новолуние, но должны были сводить этот календарь к солнечному календарю для применения к сельскому хозяйству и соблюдения соответствующих различным временам года празднеств. Все это требовало тщательных наблюдений за положением Солнца и Луны; положения этих светил наносились на карту зодиака, разделенную на 12 секций. Звезды заносились в каталог, регистрировались затмения, за планетами велись наблюдения, а движение планеты Венеры изучалось специально.

По прошествии тысячи лет вавилоняне разработали изумительную математическую систему точного предсказания движений Солнца и Луны. Эта система в основном состоит из правил вычисления зигзагообразных графиков неравномерных движений. Эти правила были эмпирическими, они не имели теоретических обоснований, но служили основой точного календаря и с их помощью можно было даже предсказывать затмения. Подобная же схема при грубой интерполяции давала положения планет. Вера в предзнаменования (пророческие знаки) процветала, и астрология стала играть важную роль.

Египтяне

Более 4000 лет назад Египет процветал, ибо воды Нила ежегодно обновляли плодородность почвы. Математики Египта занимались и магией и коммерцией. Оставленные ими тексты на папирусах относились к определению запасов зерна, разделу собственности, строительству пирамид. Их великолепные архитектурные проекты требовали хорошего математического аппарата для организации работы и управления армиями рабочих. Они имели точные весы и измерительные приборы, а также остроумные водяные часы.

Египетская астрономия была проще вавилонской. У египтян имелся солнечный год, состоящий из 12 месяцев, по 30 дней каждый + 5 лишних дней, а затмениям, Луне и планетам они уделяли куда меньше внимания. Высшим божеством в их религии было Солнце. Позднее, через две тысячи лет, они стали записывать точные наблюдения над планетами, вероятно для астрологии.

Греки

Около 3000 лет назад начала развиваться греческая цивилизация. Появились ученые — математики, философы, чьи достижения были столь значительны, что мы посвятим им отдельную главу, хотя выбор некоторых имен может показаться читателю несколько пристрастным.

Задача 1

Нарисуйте относительное положение Солнца, Земли, Луны в перечисленных ниже стадиях:

- а) в полнолуние;*
- б) в новолуние;*
- в) когда видна половина Луны;*
- г) при полном затмении Солнца;*
- д) при полном затмении Луны.*

На рисунках вы не сможете соблюсти надлежащие пропорции, однако не изображайте Землю столь же большой, как Солнце, или столь же малой, как Луна. Для ориентира приводим некоторые данные:

Солнце: расстояние от Земли $\approx 149\,500\,000$ км

Земля: диаметр $\approx 12\,756$ км

Луна: расстояние от Земли $\approx 384\,400$ км

Задача 2

Зимой в Северном полушарии Земля находится в действительности немного ближе к Солнцу, чем летом. Почему же зимой холоднее?

Задача 3. Кажущееся движение звезд и планет

Днем из-за яркого солнечного света мы не можем видеть звезд. Предположим, что мы могли бы увидеть днем вблизи Солнца некую звездную картину.

- а) Предположим, что мы заметили такую картину в полдень в июне. Когда мы должны увидеть точно такую же звездную картину в том же положении на полуночном небе?*
- б) Какой нам должна представляться траектория Солнца относительно неизменной звездной картины, от месяца к месяцу (если не учитывать суточного движения звезд и пр.)?*

- в) Начертите траекторию «внешней» планеты, такой, например, как Юпитер или Марс, относительно неизменной звездной картины (не учитывая суточного движения звезд и пр.).
- г) Начертите траекторию «внутренней планеты», например Венеры, относительно звезд.

Задача 4

Что такое равноденствия? Когда они бывают?

Задача 5. Определение широты и долготы

- а) Укажите приближенные значения широты Нью-Йорка, Сан-Франциско, Лондона, Северного полюса, Северного полярного круга, экватора.
- б) Укажите приближенные значения долготы Нью-Йорка, Сан-Франциско, Лондона, Токио.
- в) Предположим, что вы совершаете путешествие в небольшой лодке, терпите крушение и оказываетесь на необитаемом острове, далеко от того курса, по которому вы следовали. Вы хотите определить свое местоположение, но у вас нет ни радиоприемника, ни каких-либо других современных электронных устройств и нет, скажем, такого специального прибора, как секстант. Все, что есть, это простой шест с отметками для наблюдения звезд, линейка и транспортир для измерения углов. Объясните, как вы установили бы (какие измерения вы проделали бы и как бы их обрабатывали, дайте практическое объяснение, которым мог бы воспользоваться моряк, не получивший специального образования, избегайте технических выражений):
 - 1) широту места, наблюдая звезды в ясную ночь;
 - 2) широту, наблюдая Солнце;
 - 3) долготу, наблюдая Солнце или звезды (для этого нужно иметь некоторый вспомогательный прибор. Какой?).
- г) Как могут точные предсказания затмений Луны помочь в грубом определении долготы?
- д) Почему используемые для этой цели наблюдения за затмениями Луны играли большую роль в древние времена?

Насколько сильна любовь — об этом лучше всего судить,
когда любящие находятся вместе,
Но сколь долго она продлится, может проверить лишь
разлука.

Чтобы определить широту
Солнца или звезд, надо смотреть на них,
Когда они наиболее ярки, но чтобы определить
Долготу, что за путь мы можем избрать,
Кроме наблюдений за тем, где и когда происходят
затмения?

Джон Донне (1600 г.)

ГЛАВА 14 • АСТРОНОМИЯ У ГРЕКОВ. ВЕЛИКИЕ ТЕОРИИ И НАБЛЮДЕНИЯ

«Если наука — нечто большее, нежели собрание фактов, если она не просто позитивная сумма знаний, а сумма знаний, приведенная в систему, если она не просто произвольный анализ и случайный эмпиризм, а синтез, если она не просто пассивная регистрация событий и явлений, а творческая активность, — тогда без сомнения (древняя Греция) была ее колыбелью».

Джордж Сартон ¹⁾

Теория — собрание фактов; предсказание явлений

Накопление знаний по астрономии происходило со времен древних цивилизаций — от простой регистрации тех или иных фактов до систематических наблюдений, которые давали материал для составления календарей, увеличивая в то же время запутанный клубок связанных с астрологией суеверий. Из этих фактов возникали легенды, поучавшие детей или успокаивавшие простой народ. В этих легендах Солнце считалось божеством, планете Венера поклонялись, рассказывалось об «обители блаженства», находящейся над хрустальным сводом звезд. Но сами легенды не были лишь суеверными мифами. Это были предвестники научной теории, их связь с фактами была слабой, скорее фантастической, однако они создавали основу для «объяснения» этих фактов. Когда зародилась греческая цивилизация, ее мыслители основали в науке новые методы: они стали искать *общие* схемы объяснения, которые вызвали бы к человеческой любознательности. Они уже не довольствовались простыми мифами, удовлетворявшими любопытство толпы. Они ставили себе задачу «предвосхитить явление», т. е. создать такую схему, которая могла бы *объяснить факты*. Это было гораздо важнее простого собрания фактов или создания для описания каждого нового факта отдельной теории. Это был интеллектуальный прогресс, начало создания научной теории.

¹⁾ Introduction to the History of Science, v. 1, 1927 (Институт Карнеги в Вашингтоне).

Первые греческие ученые нарисовали простую картину устройства Вселенной, но по мере накопления данных они усложняли схемы, чтобы объяснить детали тех или иных явлений: сначала простые факты о Земле, затем более дегальные схемы, объясняющие движение небосвода в целом, а также Солнца, Луны и планет в отдельности.

На каждой стадии ученые пытались на основе немногих простых допущений или общих принципов создать возможно более логичное и полное «объяснение» или описание наблюдаемого явления. Такое объяснение должно было способствовать систематизации накопленных фактов и получению дальнейших предсказаний. Но прежде всего оно должно было укреплять веру в существование системы, объединяющей различные явления, в разумное устройство природы. Хотя поиски схемы иногда диктовались практической необходимостью, например необходимостью создания календаря, удовлетворение, получаемое учеными от четкого объяснения разнообразных явлений, далеко выходило за эти рамки. Вынуждаемые необходимостью задавать вопрос *почему*, греческие философы искали и создавали научные теории. Хотя наши современные стремления проверять все с помощью эксперимента и богатство научного оборудования привели к огромным изменениям в наших представлениях, мы по-прежнему разделяем восторг греков перед теорией, которая «предвосхищает явления».

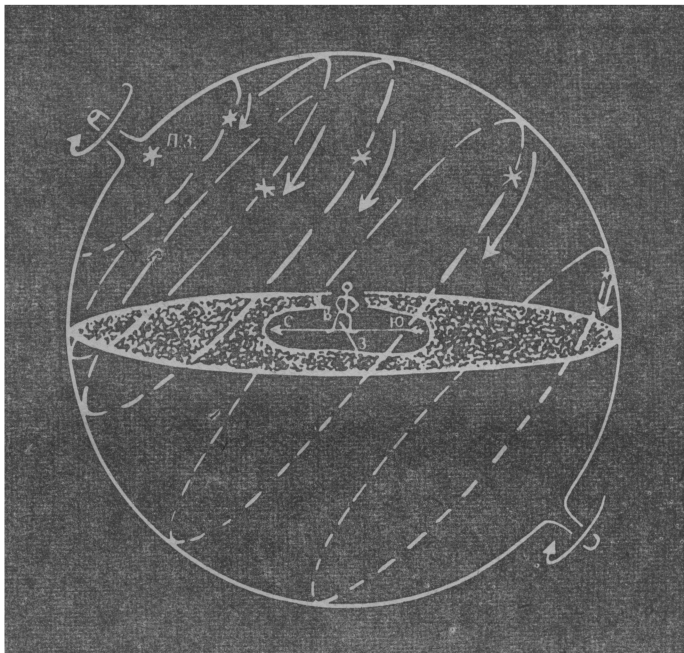
В этой главе рассказано о некоторых греческих ученых. Посмотрим, как создавались их теории.

Древнегреческая астрономия

Свыше 3000 лет назад, когда происходило развитие греческой цивилизации, поэты (и среди них великий Гомер) слагали повествования о существовавших прежде государствах и пытались ответить на некоторые вопросы об устройстве мира. Землю тогда считали островом, омываемым большой рекой и накрытым, как огромным колоколом, небесным сводом. Обитель богов находилась на «краю Земли». Ад (страна мертвых) также находился на краю Земли или, возможно, под Землей. Солнце ежедневно поднималось из омывающей Землю реки и скользило затем по лежащему над Землей небосводу.

Около 2500 лет назад появились ученые, пытавшиеся создать разумное описание окружающего мира.

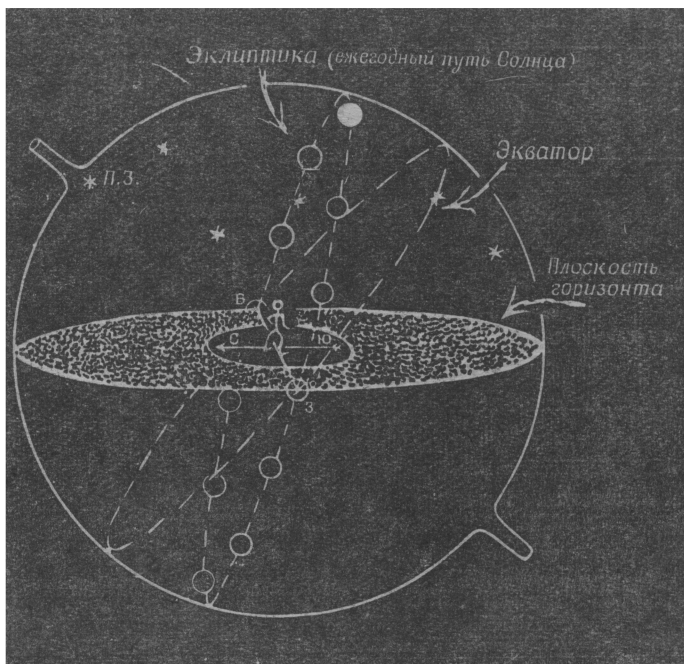
Фалес (~600 г. до н. э.) был основоположником греческой науки и философии. Впоследствии его репутация как одного из «семи мудрецов» стала столь легендарной, что ему начали приписывать невероятные открытия, вроде предсказания солнечного затмения. Фалес собрал все, что было сделано до того времени в области геометрии (вероятно, это были сведения, почерпнутые в Египте),



Фиг. 23. Вселенная по представлению Фалеса.

и привел геометрию в некую систему принципов и выводов, т. е. положил начало той науке, которую Евклид привел к расцвету. Фалес считал, что Земля — плоский диск, плавающий на воде; однако он знал, что Луна светится отраженным солнечным светом. Следовательно, он размышлял над наблюдаемыми явлениями, стараясь понять причины, их обусловившие. Предполагают, что Фалес знал о том, что магнитный железняк, природный магнит, может притягивать железо; считают также вероятным, что он открыл

появление электрических зарядов при натирании янтаря (по-гречески янтарь — «электрон»). Более того, он предложил общее объяснение устройства Вселенной. Фалес считал, что вода — это «высший принцип», исходное вещество, из которого построено все остальное. Это было смелое начинание в «натурфилософии». Фалес был истинным ученым, ибо считал, что строение Вселенной можно объяснить на основе обычных знаний и рассуждений.



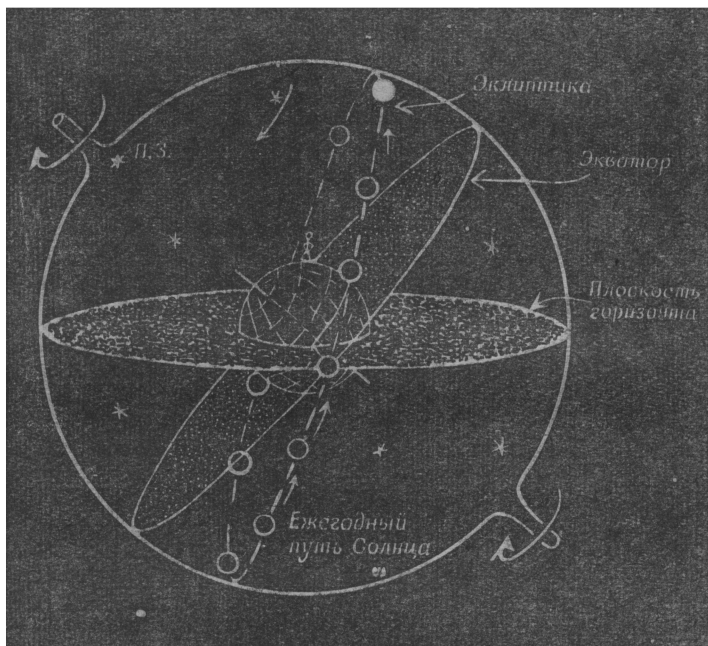
Фиг 24, Ежегодный путь Солнца по звездному небу согласно представлениям древних греков.

Плоскость эклиптики составляет угол с плоскостью экватора. Солнце показано в положении, соответствующем середине лета, другие положения также указаны на рисунке. Небесная сфера не вращается, она как бы скреплена с Полярной звездой.

Тогда считалось, что звезды прикреплены к вращающейся сфере. Фалес обнаружил наклон эклиптики, т. е. годовой траектории Солнца относительно звезд. Такое отделение годового движения Солнца от суточного было очень важным шагом. Звездный пояс

вдоль траектории Солнца был разделен на двенадцать равных частей, «знаков зодиака», каждая из которых носила название определенного созвездия. Траектории Луны и планет очень близки к траектории Солнца, поэтому и они также проходят через знаки зодиака.

Пифагор (~530 г. до н. э.). Ко времени основания Пифагором философской школы (в области религии, науки, политики...)

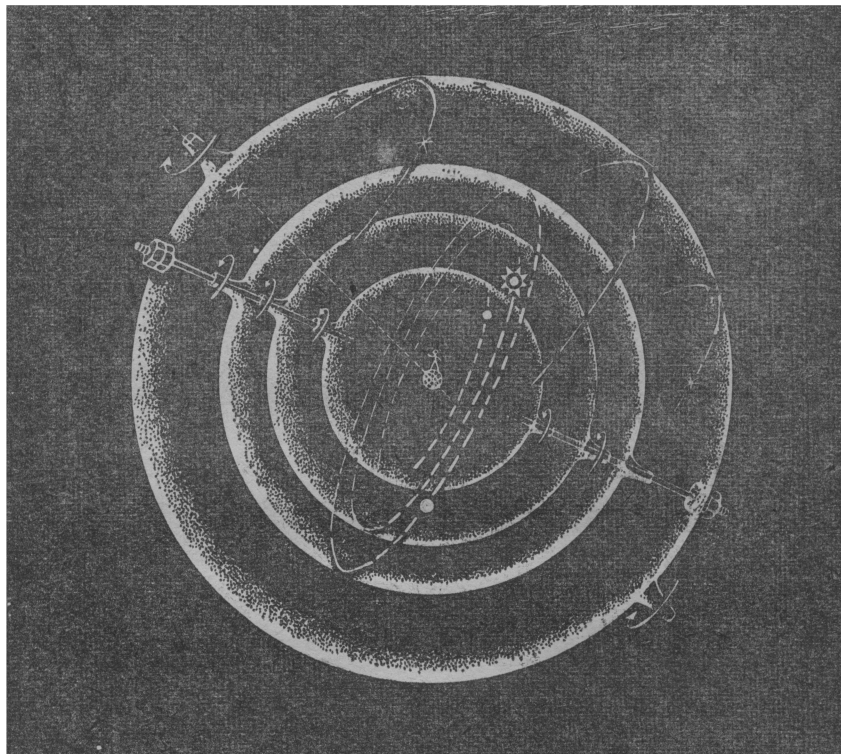


Фиг. 25. Небесная сфера по представлению Пифагора.

Школа Пифагора считала Землю сферической и отличала суточное движение звезд, Солнца, Луны и планет от медленного движения этих светил вспять по отношению к звездному небу.

была подготовлена почва для восприятия представления о шарообразности Земли. Рассказы путешественников о кораблях и звездах должны были бы навести любознательных на мысль о том, что Земля имеет кривизну. Однако в представление о Земле как о шаре трудно было поверить. Вы принимаете это представление

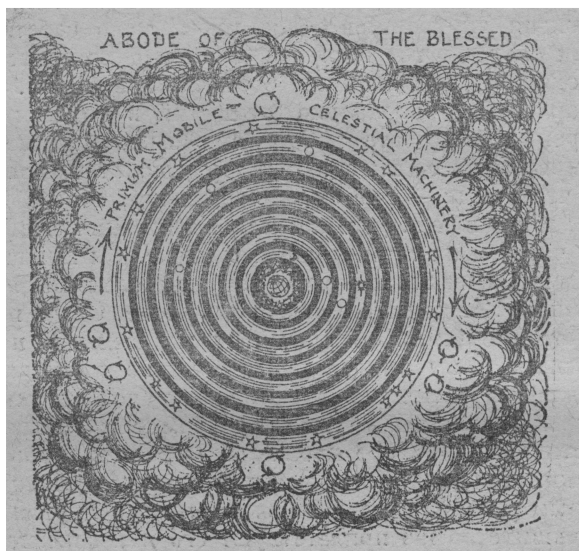
легко, ибо оно внушалось вам с детства, а вот понаблюдайте за ребенком, который впервые узнает об антиподах, жителях противоположного полушария, где люди ходят по отношению к нам «вниз головой»! Сам Пифагор, вероятно, считал Землю круглой, но нам



Фиг. 26. Система хрустальных сфер по представлениям древних греков. Выделены вращающиеся сферы двух планет, увлекаемые сферой звезд, совершающей полный оборот в течение суток.

неизвестно, принадлежала ли большая часть открытий Пифагору или его ученикам; школа его процветала примерно двести лет. Последователи Пифагора представляли себе Землю шарообразной, сплошь населенной и окруженной концентрическими прозрачными сферами, на каждой из которых находилось небесное тело. На самой внутренней сфере — Луна, которая, очевидно, ближе к Земле,

чем остальные светила. Внешняя сфера содержала звезды, а промежуточные сферы — Меркурий, Венеру, Солнце, Марс, Юпитер и Сатурн. Внешняя звездная сфера совершала полный оборот в течение дня и ночи; другие сферы вращались несколько медленнее, что обуславливало запаздывание движения Солнца, Луны и планет. Это была простая научная теория с простой схемой вращающихся сфер (сферы, постоянные скорости вращения), о кото-



Фиг. 27. Сечение всей системы хрустальных сфер в плоскости эклиптики.

рой можно было сказать, что она основана на простом общем принципе (сферы — это «совершенные» формы, а постоянные вращения — «совершенные» движения). Сферы, несущие планеты, располагались в соответствии со скоростями вращения последних: Сатурн, движущийся почти так же, как звезды, отстающий от них только на один оборот за тридцать лет, помещался сразу за звездной сферой; затем шли Юпитер, Марс и Солнце; Венера и Меркурий помещались непосредственно внутри или вне сферы Солнца. Такое расположение светил по скоростям было удачной догадкой. Теперь известно, что Сатурн, Юпитер и Марс — это «внешние» планеты, отстоящие от Солнца дальше, чем Земля,

причем Сатурн — наиболее удаленная планета, а Марс — ближайшая.

Некоторые последователи Пифагора считали, что вращение за 24 часа можно дробить на части, и предполагали поэтому, что внешняя звездная сфера увлекает за собой при своем вращении все другие сферы. Внутренние сферы должны медленно вращаться в *обратном направлении* внутри внешней сферы, увлекая, таким образом, Солнце, Луну и планеты к зодиакальному поясу звезд. Каждая внутренняя сфера имеет свою собственную скорость, один оборот в год в случае Солнца, один в месяц в случае Луны, ... один в двенадцать лет в случае Юпитера... .

Пифагор сделал несколько открытий в области геометрии. Хотя теорема о «квадрате гипотенузы» была известна задолго до него, он первый дал ее вывод. Пифагор развил также теорию чисел. Он учил, что «*числа — это сущность вещей*», основа всех знаний о природе, и его школа уделяла много внимания арифметическим свойствам чисел и их применениям в науке. Он придавал некоторым числам мистические значения, которые волновали воображение людей за много лет до него и еще долго после. Среди первобытных людей некоторые числа считались счастливыми, а некоторые — несчастливыми, и им придавали магические свойства. Впрочем, до наших дней маститые ученые при обсуждении структуры атомов и структуры Вселенной пользуются термином «магические числа»¹⁾. Мистицизм Пифагора проявлялся вновь и вновь в ходе развития науки. Недалекие люди осуждают этот мистицизм, считая его коварным утесом, который может вызвать крушение корабля науки, большинство же приветствуют его как спасительный буй, который может поддерживать на поверхности плодотворные теории, когда движение вперед кажется трудным. В наши дни специалисту трудно провести различие между полезным мистицизмом (таким, например, как представление о положительном электроны и об «антивеществе») и эксцентричной чепухой. Различие, однако, достаточно резкое: современный ученый, даже когда он настроен весьма мистически, пользуется ясным словарем, составленным из четко определенных терминов, значение которых согласовано между ним и его коллегами; и он не только проводит эксперименты для проверки и подтверждения своих предположений, но настаивает на критическом исследовании надежности эксперимен-

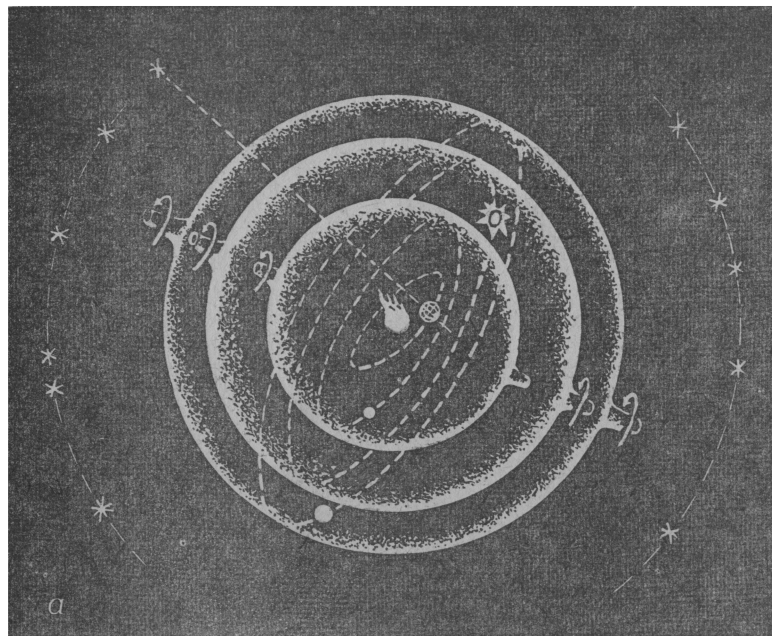
¹⁾ «Магические числа» полезны в ядерной физике и поэтому занимают там почетное место. Современным примером почти бессмысленного числового мистицизма может служить описание атома Бора в некоторых руководствах по химии.

тальных данных. Человек с причудами может ссылаться на эксперимент, соответствующий его целям, но ему не удастся завоевать доверие с помощью предвзятого выбора. Среди ученых существует некое общее здравомыслие, не ограничивающее плодотворное воображение, а направляющее его в разумные каналы.

Пифагор был здравомыслящим ученым. Развивая науку о музыке (области прекрасной с точки зрения изучения свойств чисел), он приписал простые числовые соотношения музыкальным тонам. Эти соотношения сохранились и поныне: чтобы две ноты, отстоящие друг от друга на октаву, звучали абсолютно в тон, они должны иметь частоты колебаний, относящиеся как $2 : 1$, а частоты нот, отстоящие друг от друга на квинту, должны относиться как $3 : 2$. Чтобы такие же гармонические интервалы давали струны арфы различной длины, частоты их тоже должны находиться в соотношении $2 : 1$ для октавы и $3 : 2$ для квинты. Другие простые соотношения частот, например $4 : 3$, дают приятный аккорд, а сложные отношения, вроде $4,32 : 3,17$, звучат неприятно (диссонансом) для нашего слуха, воспитанного на классической музыкальной гамме. Представление об основных гармонических пропорциях было распространено Пифагором и на астрономию. Его последователи считали, что сферы, содержащие планеты, располагаются в соответствии с музыкальными интервалами: их размеры и скорости вращения должны удовлетворять простым числовым соотношениям. Вращаясь с соответствующей скоростью, каждая сфера издает музыкальный тон. Вся система сфер образует гармонию, «музыку сфер», неслышную обычным людям; впрочем, многие считали, что чести ее слышать был удостоен великий учитель Пифагор. Но по тем временам даже эта фантастическая схема не была антинаучной. Научными данными тогда почти совсем не располагали; расстояния от Земли до Солнца и планет не были известны, и не было даже надежды их измерить, так что небесные гармонии лишь усиливали интерес к этим проблемам. Спустя восемь веков один романтически настроенный историк писал: «Пифагор считал, что Вселенная звучит и устроена в соответствии с гармонией; он первый свел движение семи небесных тел к ритму и звучанию»¹.

Филолай. Солнце, Луна, Венера, Меркурий, Марс, Юпитер, Сатурн — семь планет в том порядке, как их перечисляли греки, — все медленно движутся *среди звезд* с запада на восток. Звезды же

¹ Ипполит, цитируемый Дж. Сартонем (G. Sarton, A History of Science, Harvard, 1952, p. 214).



Фиг. 28. Схема Филолая.

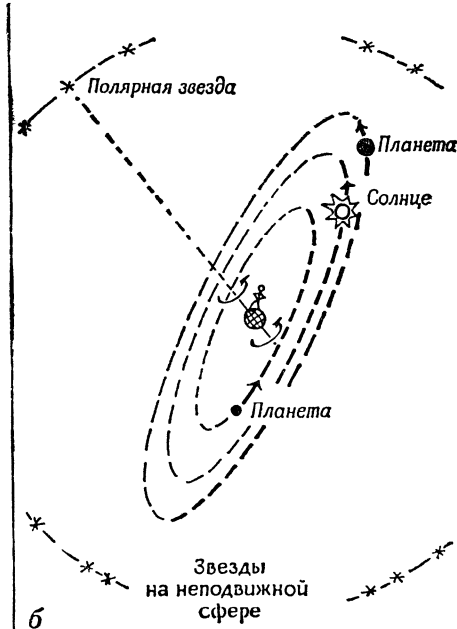
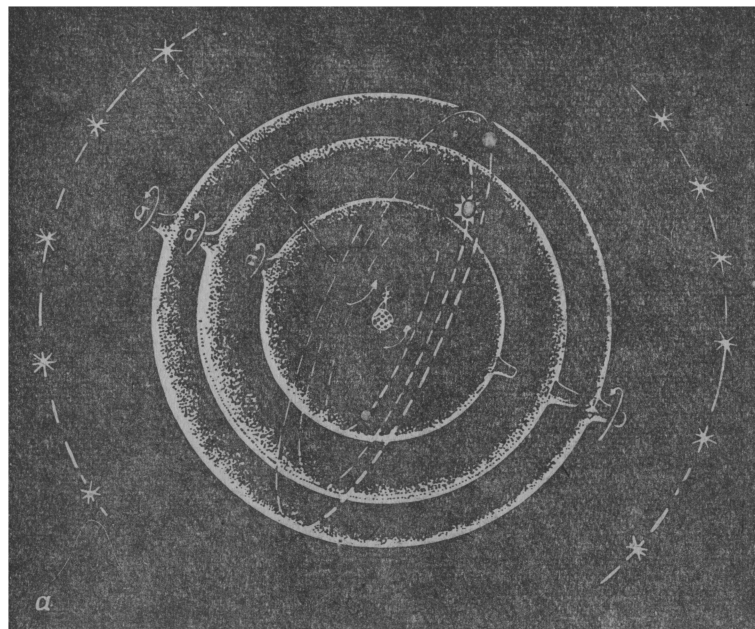
а — система сфер; **б** — схема орбит. Земля вращается вокруг центрального огня, совершая полный оборот за 24 часа. Этим объясняется суточное движение звезд, Солнца, Луны и планет. Сферы медленно вращаются в том же направлении, на них находятся Солнце, Луна и планеты.

увлекают за собой все ежедневно с востока на запад. Это несоответствие, портившее всю простоту схемы, можно устранить, предположив, что вращается Земля, а не звезды, тогда все светила будут двигаться в одном направлении. Филолай, ученик Пифагора, придерживался следующей точки зрения: центром Вселенной является не Земля, а центральный огонь — «сторожевая башня богов»; Земля вращается вокруг этого огня, совершая за сутки полный оборот по малой орбите, причем ее обитаемая часть всегда обращена в противоположную сторону от этого центрального огня. Это движение Земли объясняло ежедневное движение звезд на небе: внешняя хрустальная сфера при этом могла покоиться. (Были еще более далекие предположения — между Землей и центральным огнем находится еще одна планета, которая предохраняет антиподов от ожога, а быть может сама есть антипод; наличие этой планеты увеличивало общее число небесных тел до священного числа Пифагора — десяти.)

Столь фантастическая схема была весьма революционной: согласно ей Земля рассматривалась как планета, а не как божественный центр, и вращение звездной сферы можно было свести к ежедневному вращению Земли. Эта схема могла бы послужить основой для более поздних теорий движения Земли, но просуществовала она недолго и в ней никогда не предполагалось, что центром мироздания является Солнце или что Земля просто вращается. Эта последняя простая идея вскоре была высказана, но не встретила поддержки.

Последователи Пифагора знали, что Земля круглая. Они основывали свои предположения на простом принципе (совершенство сферы) и на фактах. Движение небесных тел они описывали с помощью простой схемы, которую можно было назвать *теорией*, в противоположность более точным повседневным *правилам*, развитым в Вавилоне. Если рассматривать эту первую греческую систему вращающихся сфер как некую машину, выдающую предсказания, то она была безнадежно неточной, зато как система знаний оказалась действительно превосходной, ибо давала ощущение разумности устройства Вселенной.

Сократ (~430 г. до н. э.). Этот великий философ боролся за ясность мышления и четкие определения, осуждая сумасбродные фантазии астрономов. Вероятно, именно он помог астрономии стать индуктивной наукой, основанной на экспериментальных наблюдениях.



Фиг. 29. Более поздняя система Пифагора.

а — сферы, несущие Солнце и две планеты; б — схема орбит.

Вращение шарообразной Земли объясняется суточным движением звезд, Солнца, Луны и планет. Сферы медленно вращаются в том же направлении. Луна совершает полный оборот за месяц, Солнце — за год, а каждая планета — за один планетный «год».

Примерно в то же время два философа, *Демокрит и Левкипп*, пытались создать атомистическую теорию, чтобы объяснить свойства материи и даже строение мира в целом. Они считали невероятным, что материю можно беспредельно делить на все более мелкие части. Должны существовать крошечные неделимые атомы. Хотя у этих ученых не было экспериментальных доказательств и они основывались лишь на фантастических предположениях, им удалось создать теорию, которая выглядит разумной и в наши дни ¹⁾. Они подготовили атомистическую теорию, над которой задумывались и которой иногда пользовались на протяжении многих веков, пока развитие человеческих знаний в области химии не привело в течение последних двухсот лет, наконец, к созданию атомной теории. Их записи были утеряны, но римский поэт Лукреций изложил двумя столетиями позже эти идеи в своей великолепной поэме. Он считал, что «разум освобождает человека от страха перед богами» — поэтическая версия современной точки зрения о том, что «наука излечивает от суеверий».

Хотя атомистическая теория не была непосредственно связана с астрономией, однако высказывавшееся в ней утверждение о том, что атомы отделены друг от друга пустотой, позволило легче усвоить представление о пустом пространстве между небесными телами и за ними, в противоположность представлению древних греков о том, что пространство ограничено и заполнено невидимым эфиром.

Платон (~390 г. до н. э.), строго говоря, не был астрономом. Он считал правильной простую схему сфер и размещал по порядку их скоростей вращения: Луну, Солнце, Меркурий и Венеру, движущиеся вместе с Солнцем, Марс, Юпитер, Сатурн. Первая схема, которая, казалось, успешно описывала движения планет, была создана Евдоксием, возможно по предложению Платона.

Евдоксий (~370 г. до н. э.) изучал геометрию и философию под руководством Платона, затем путешествовал по Египту и, возвратившись в Грецию, стал великим математиком и основателем научной астрономии. Собирая греческие и египетские данные по астрономии и добавляя лучшие из наблюдений, проведенных в

¹⁾ Было бы историческим мистицизмом называть эту греческую атомистическую теорию, несмотря на ее кажущуюся современность, предвидением атомной химии Дальтона (1800 г.). Она не являлась научным открытием, опередившим на 2000 лет свое время. Это была великая идея, которая должна была еще 2000 лет дожидаться своего научного воплощения.

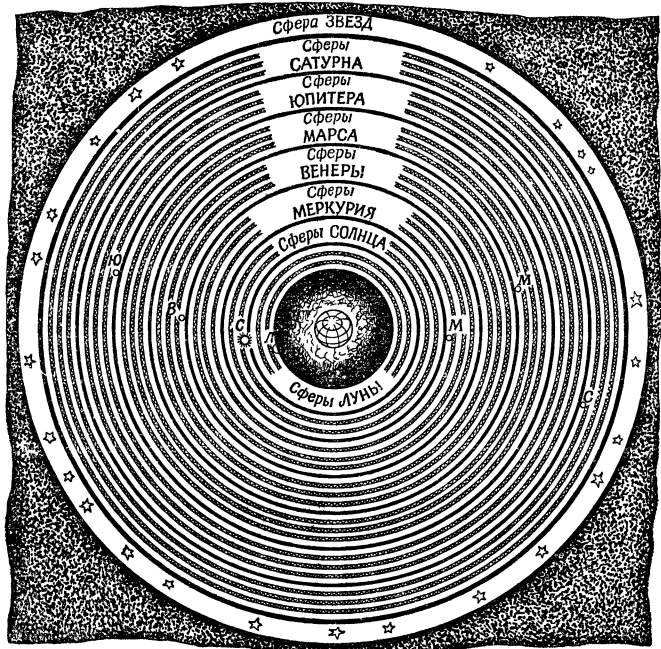
Вавилоне, он предложил схему, которая могла объяснить наблюдаемые явления.

Система из нескольких сфер, по одной для каждого движущегося небесного тела, очевидно была неудовлетворительной. Планета не движется с постоянной скоростью по круговой траектории относительно звезд, она движется то быстрее, то медленнее, даже временами останавливается и начинает двигаться в обратном направлении. Солнце и Луна движутся по своим годовым и месячным траекториям с переменными скоростями ¹⁾. Евдоксий разработал схему, состоящую из большого числа концентрических сфер, подобно шелухе луковицы. Каждой планете соответствовало несколько сфер, расположенных одна внутри другой и вращающихся вокруг различных осей: по три сферы для Солнца и Луны, по четыре для каждой планеты и одна внешняя сфера для всех звезд. Каждая сфера закреплена на оси, которая проходит через отверстие в следующей сфере, и расположена вне, причем оси вращения имеют различные направления. Комбинированные движения с надлежащим образом выбранными направлениями вращения соответствуют наблюдениям. Такая система была проста по форме (сферы) и основана на простом принципе (равномерное вращение); она могла удовлетворительно объяснить наблюдаемые факты путем введения, по мере необходимости, добавочных сфер. Это была в самом деле хорошая теория.

Чтобы создать хорошую теорию, мы должны располагать простыми принципами или допущениями и должны уметь вывести из них схему, достаточно разумно объясняющую все факты. Полезность теории и эстетическое наслаждение, которое мы в ней находим, зависят как от простоты принципов, лежащих в ее основе, так и от того, насколько точно она соответствует фактам. Делая предсказания, мы ожидаем, что они окажутся плодотворными, но часто плодотворность обусловлена двумя достоинствами — простотой и точностью. Для ученых Греции, да и для многих современных ученых, хорошая теория — это просто теория, которая может точно объяснить все явления. Оценивая качества той или иной теории, следует спросить: «Настолько ли она проста, насколько это возможно?» и «Насколько точно она объясняет явления?». Если мы спросим также: «*Правильна ли она?*», то это не вполне справедливое требование. Мы могли бы составить *истинную*

¹⁾ Например, четыре времени года — от весеннего равноденствия до середины лета, от середины лета до осеннего равноденствия и т. д. — неодинаковы по протяженности. Вавилоняне в своих схемах для регулирования календаря по волюнию имели графики неравномерных движений Луны и Солнца.

историю движения планет, описывая их положения день ото дня за последние 100 лет; наше описание было бы верным, но настолько далеким от простого, настолько бесхребетным, что мы должны были бы его назвать просто перечнем фактов, а не теорией ¹⁾.



Фиг. 30. Схема Евдоксия.

Солнце, Луна и планеты имеют несколько сфер, вращающихся с постоянной скоростью вокруг различных осей. Комбинация этих движений имитирует видимые движения Солнца, Луны и планет на звездном небе.

Первоначальные представления греков о хрустальных сферах были похожи на мифы или сказки для детей; это было простое объяснение явлений, созданное учеными для простых людей. Однако Евдоксий попытался придумать такую модель, которая описывала бы действительное движение планет и предсказывала бы их будущее. По всей вероятности, он рассматривал свои сферы как геометри-

¹⁾ Молодые ученые не должны ограничиваться накоплением тех или иных фактов или сведений, чтобы не застрять на догреческой стадии развития науки.

ческие конструкции, а не как реальные небесные тела, поэтому для него не представляло труда вообразить, что существует несколько дюжин таких сфер, плавно вращающихся одна внутри другой. Он не указывает механизма, обеспечивающего вращательное движение сфер; можно считать, что эти движения осуществляются богами или же просто существуют в воображении математиков.

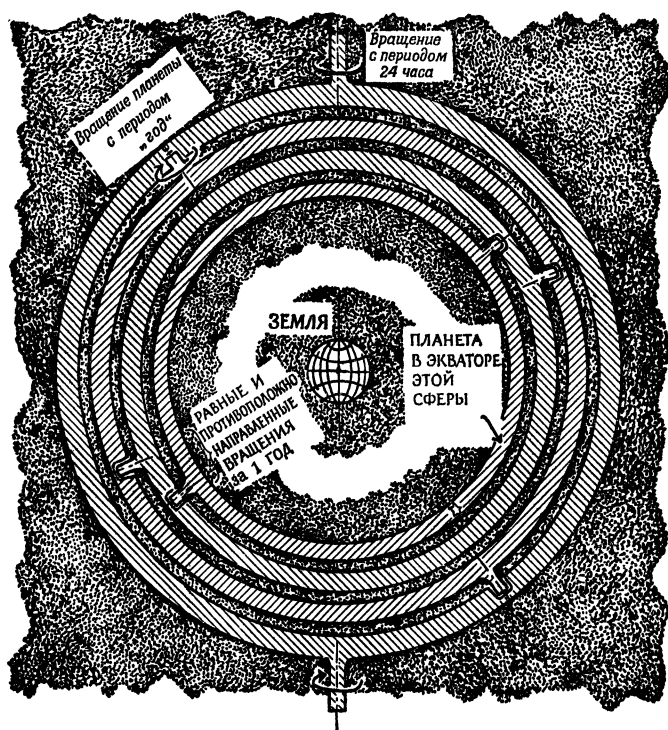
Вот как Евдоксий объясняет движение планеты с помощью четырех сфер. Планета укреплена на внутренней сфере, где-то на ее экваторе. Внешняя из четырех сфер вращается вокруг идущей с севера на юг оси, совершая полный оборот за 24 часа, что объясняет суточное движение планеты со звездами. Следующая внутренняя сфера вращается вокруг оси, закрепленной во внешней сфере и наклоненной под углом $23\frac{1}{2}^\circ$ с севера на юг, так что ее экватор является эклиптикой Солнца и планет. Эта сфера вращается в собственном «году планеты» (время, в течение которого планета обходит зодиак), так что ее движение соответствует общему движению планеты относительно звездного неба ¹⁾. Эти две сферы эквивалентны двум сферам простой системы — внешней звездной сфере, которая увлекает за собой все внутренние, и собственной сфере планеты. Третья и четвертая сферы совершают одинаковые и противоположно направленные вращения вокруг осей, наклоненных одна к другой под некоторым малым углом. Ось третьей сферы вращается в зодиаке второй, а четвертая несет саму планету, как бы вставленную в экватор. В результате сложения всех этих движений планета движется по петлеобразной траектории. Полную картину этого трехмерного движения трудно наглядно представить.

С помощью всего 27 сфер Евдоксий построил систему, хорошо имитирующую наблюдаемые движения планет. Основной его схемы являлись простые сферы, вращавшиеся с неизменными скоростями вокруг общего центра — Земли. Построение этой системы потребовало сложных математических вычислений: надо было рассмотреть четыре движения для каждой планеты и выбрать надлежащим образом оси и скорости вращения, чтобы получить соответствующие наблюдениям результирующие движения. Эту задачу удалось решить с помощью сложных геометрических построений. Евдоксий пользовался в некотором роде гармоническим анализом (в трехмерной форме!) за две тысячи лет до Фурье. Это была хорошая теория.

Хорошая, но не очень. Евдоксий знал, что его система несовершенна и что более точные наблюдения приводят к дальнейшим

¹⁾ Согласно современной терминологии, вращение внешней сферы соответствует суточному вращению Земли; вращение следующей сферы соответствует собственному движению планеты по ее орбите вокруг Солнца; вращение двух других сфер комбинируется так, чтобы объяснить эффект наблюдения с Земли, которая движется в течение года вокруг Солнца.

затруднениям. Очевидный выход из положения — увеличение числа сфер — был использован его последователями. Один из его учеников, посоветовавшись с Аристотелем, добавил еще 7 сфер, что значительно улучшило согласие с наблюдаемыми фактами.



Фиг. 31. Часть схемы Евдоксия.

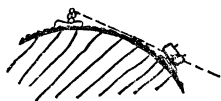
Четыре сферы, описывающие движение планеты. Внешняя сфера совершает один оборот за 24 часа, следующая внутренняя сфера совершает один оборот за планетный «год». Две внутренние сферы вращаются с одинаковыми и противоположно направленными скоростями, совершая оборот в течение одного земного года, что определяет петлеобразную траекторию планеты.

Например, изменения в движении Солнца, обуславливающие различие времен года, можно было после этого усовершенствования предсказать надлежащим образом. Самого Аристотеля беспокоило то, что сложное движение, совершаемое четверкой сфер одной планеты, должно передаваться соседней четверке планет, хотя это

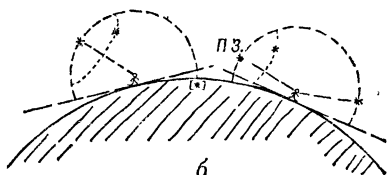
было нежелательно. Он ввел дополнительные сферы, чтобы «развязать» движение планет, так что в результате получалось всего 55 сфер. Этой системой пользовались в течение столетия или даже больше, пока не была предложена более простая геометрическая схема (один энтузиаст пытался восстановить ее спустя 2000 лет, введя 77 сфер).

Аристотель (340 г. до н. э.), великий учитель, философ и ученый-энциклопедист, был «последним великим философом-созерцателем в античной астрономии». Он был очень религиозен и верил

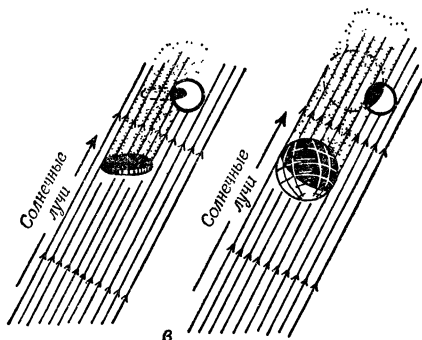
В ДРЕВНОСТИ



а



б



в

СОВРЕМЕННЫЕ

фотографии, полученные
во время космических
полетов; геодезические
наблюдения

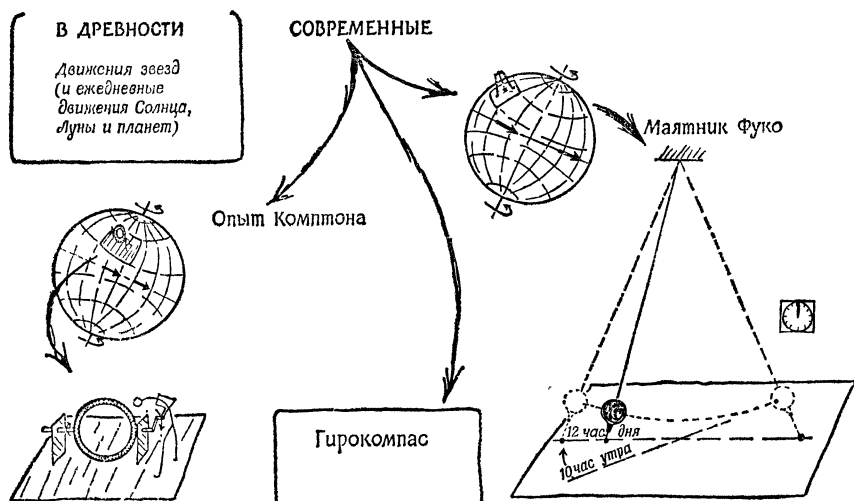
Фиг. 32. Доказательства шарообразности Земли.

а — корабли исчезают за линией горизонта; б — когда наблюдатель едет на север, Полярная звезда занимает все более высокое положение, положение других звезд меняется, а некоторые звезды, находящиеся на юге, исчезают из поля зрения; в — тень Земли, падающая на Луну во время затмения, имеет круглую форму, а не овальную.

в то, что на великолепных усеянных звездами небесах существует бог. Он восхищался астрономией и уделял ей много времени. Поддерживая схему концентрических сфер, он выдвигал следующий догматический довод: *сфера — идеальная форма*. Этот предвзятый взгляд на орбиты планет существовал в течение столетий. По той же причине считалось, что Солнце, Луна, планеты, звезды

должны иметь сферическую форму. Небеса, таким образом, есть область совершенства, неизменного порядка и круговых движений. Пространство между Землей и Луной Аристотель считал подверженным изменениям с естественной тенденцией к падению тел по вертикали.

На протяжении многих веков сочинения Аристотеля представляли собой единственную попытку систематизировать природу в целом. Они переводились с одного языка на другой, передавались из Греции в Рим и Аравию и снова через несколько столетий в Европу для переписки, перепечатки, изучения и цитирования как авторитетный источник. Долгое время после того как хрустальные



Фиг. 33. Доказательство вращения Земли.

Опыт Комптона — кольцообразная трубка с водой, содержащая опилки, внезапно переворачивается, по опилкам можно судить, насколько незначительно движение воды; *маятник Фуко* — длинный маятник, совершающий колебания, медленно меняет плоскость колебаний, *гирокомпас* — ось вращения маленького гироскопа с грузом устанавливается в направлении с севера на юг.

сферы были отвергнуты и заменены эксцентрическими кругами, об этих последних говорили как о сферах; средневековые схоласты то и дело возвращались к хрустальным сферам в своих дискуссиях и считали эти сферы реальными. Различия между совершенными небесами и подверженной изменениям Землей оставались столь значительными, что спустя 2000 лет Галилей вызвал огромное возму-

щение, доказав существование гор на Луне и предположив, что Луна подобна Земле. И даже Галилей, понимая законы движения, все же считал, что падение тел на Земле трудно связать с вращением небесных тел.

Аристотель сделал много, чтобы доказать, что Земля круглая. Для этого он приводил следующие соображения:

- 1) *Симметрия*: сфера симметрична и совершенна.
- 2) *Давление*: составные части Земли, стремясь упасть *естественно* к ее центру, сжимают ее в виде шара.

Упоминались также следующие факты:

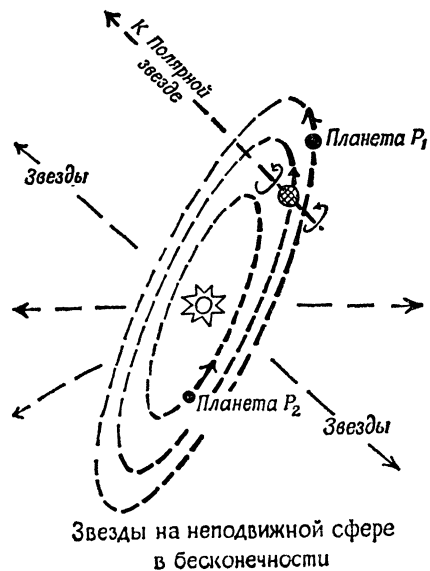
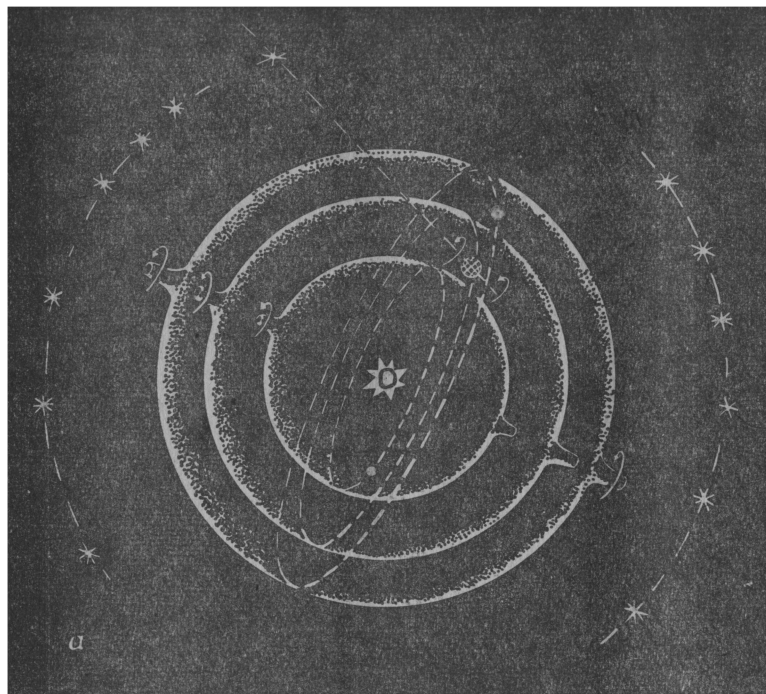
- 3) *Тень*: при затмении Луны край тени Земли, падающей на Луну, всегда имеет круглую форму, тогда как плоский диск отбрасывал бы овальную тень.
- 4) *Высота звезд на небосводе*: даже при коротких путешествиях на север или на юг путешественник замечает изменения положения созвездий.

Эта смесь догматических «рассуждений» и основанного на эксперименте здравого смысла типична для Аристотеля; он сделал очень много для развития науки. Его учение — замечательный труд всей его жизни — имело большой резонанс и оказало огромное влияние на дальнейшее развитие науки. С одной стороны, он систематизировал научные факты и зафиксировал будоражающие мысль вопросы; с другой стороны, выявил основные проблемы научной философии, проводя различие между *истинными физическими причинами* вещей и *воображаемыми схемами, создаваемыми для объяснения явлений*.

Вскоре после Аристотеля *Евклид* собрал все предшествующие работы по геометрии, добавил ряд собственных и создал великолепную науку, развитую с помощью дедуктивной логики. Такого рода математическое построение, разумеется, справедливо по отношению к лежащим в его основе допущениям и определениям. Проверить, насколько оно удовлетворяет законам окружающего мира — задача эксперимента. Поэтому мы не должны подвергать сомнению ту или иную область математики, но и не имеем права считать ее *естественной наукой*.

Научная школа в Александрии

Александр Великий основал мощную империю. За двенадцать лет он прошел со своими войсками из Греции через Малую Азию, Египет, Персию к границам Индии и обратно к Вавилону. В на-



Фиг. 34. Схема Аристарха.

α — система сфер; δ — схема, на которой показаны орбиты планет. Показаны две планеты: P_1 — может быть Марсом, Юпитером или Сатурном; P_2 — Меркурием или Венерой.

чале своего похода он основал в устье Нила большой город — Александрию. Здесь собралось много греческих ученых, и Александрийский музей (или Александрийский университет) стал крупным центром просвещения. Школа астрономов возникла примерно в 330 г. до н. э. и процветала в течение нескольких веков. Ученые проводили точные наблюдения, конструировали новые приборы; были попытки измерить расстояние до Солнца и Луны и определить действительные размеры этих светил; создавались новые и более совершенные теории.

До того как эта школа перешла от представления о вращающихся сферах к эксцентрическим кругам, греческий астроном *Аристарх* (~240 г. до н. э.) сделал два упрощающих предположения:

- 1) *Земля вращается, и этим вращением объясняется суточное движение звезд;*
- 2) *Земля движется вокруг Солнца, совершая полный оборот по орбите в течение года;* другие планеты движутся подобным же образом — это объясняет видимые движения Солнца и планет относительно звезд.

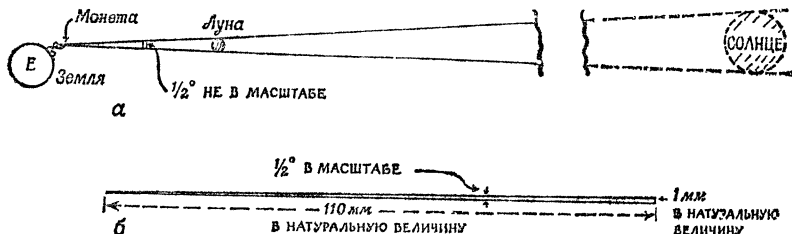
Эта простая схема не имела успеха: она противоречила традициям и была лишь идеей, не подкрепленной измерениями, как это сделал много позже Коперник. Возможность движения Земли по орбите вызывала возражения с точки зрения тогдашних представлений о механике, которые впоследствии оказались даже еще более серьезными; кроме того, эта идея немедленно привела к другого рода затруднениям с точки зрения астрономов. Если Земля движется по орбите, имеющей большую протяженность, то в течение года у созвездий должны наблюдаться параллаксы. Между тем таких параллаксов не наблюдалось, и Аристарх мог объяснить этот факт только тем, что звезды удалены от Земли на расстояния, бесконечно большие по сравнению с диаметром земной орбиты. Таким образом, он не только «поместил» звезды гораздо дальше, чем предполагалось ранее, но и освободил их от необходимости находиться всем на одной большой сфере. Поскольку звезды находятся так далеко, они могут быть рассеяны в пространстве и находиться в покое, в то время как Земля будет вращаться.

Измерения размеров и расстояний

Астрономы стали пытаться определить действительные размеры Солнца, Луны и Земли и их взаимные расстояния. Ранее существовали лишь смутные догадки: некоторые считали, что Солнце и

Луна находятся очень далеко, другие же — что они находятся непосредственно за облаками; считали, что Солнце имеет такие же размеры, как Греция, а Луна меньше... Надежные измерения могли бы превратить астрономию в значительно более реальную науку, но их было трудно осуществить.

Человек обычно определяет расстояние на глаз, оценивая угол между лучами зрения, когда оба глаза направлены на предмет. Наши глаза расположены слишком близко друг к другу, и с их помощью нельзя определять расстояния до предметов, удаленных



Фиг. 35. Соотношение между размерами удаленного предмета и расстоянием до него.

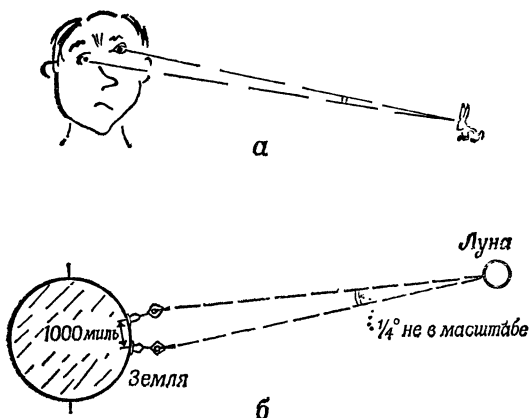
Соотношение можно найти, держа монету известных размеров на измеренном расстоянии так, чтобы она закрывала предмет; с помощью этого метода нельзя определить абсолютные размеры или расстояния.

а — схема дана не в масштабе; б — «угловые размеры» Солнца и Луны, нанесенные в масштабе. Измерения показывают, что Солнце и Луна видны с Земли под углом $1/2^\circ$. Тригонометрические таблицы дают соотношение 1 : 110 для основания и высоты.

на большие расстояния. Поэтому мы пользуемся для этой цели более длинной базой и измеренными углами. Затем мы, соблюдая масштаб, строим диаграмму или используем тригонометрию. Теперь мы знаем, что для Луны база в 1000 миль дает угол всего $1/4^\circ$. Для Солнца этот угол равен $1/1600^\circ$ и его очень трудно измерить даже сейчас, когда наблюдатели располагают большими возможностями.

Размеры Солнца (или Луны) можно просто связать с расстоянием до нас, измеряя угловой диаметр. Держите монету в вытянутой руке, то придвигая ее ближе к глазам, то отодвигая дальше; пока она не закроет солнечный диск. Измерив диаметр монеты и расстояние ее от глаза и определив отношение этих размеров, можно получить отношение диаметра Солнца к расстоянию Солнца от Земли. Это отношение равно примерно 1/110. С помощью прибора можно измерить угол, под которым диаметр Солнца виден с Земли; этот угол почти точно равен $1/2^\circ$. Нарисуйте на боль-

шом листе бумаги треугольник, угол при вершине которого равен $1/2^\circ$, и измерьте длину его сторон. Или же воспользуйтесь простыми тригонометрическими соотношениями. Вы найдете, что расстояние от основания треугольника до его вершины приблизительно в 110 раз больше основания. Отсюда следует, что *расстояние от Солнца до нас в 110 раз больше его диаметра*. Почти то же соотношение справедливо и для Луны — Луна и Солнце *кажутся*



Фиг. 36. Оценка расстояний.

а — по углу между лучами зрения; *б* — на основании того, что расстояние до Луны, определенное по углу между лучами зрения, позволило бы наблюдателю, находящемуся на расстоянии 1000 миль, заметить разницу в $1/4^\circ$.

приблизительно равными по величине, что подтверждается полными затмениями Солнца, когда Луна точно закрывает его. Измеряя одну из этих величин — диаметр или расстояние — и пользуясь коэффициентом 110, можно определить другую величину. Обычно измеряют расстояние, оценивая его на глаз.

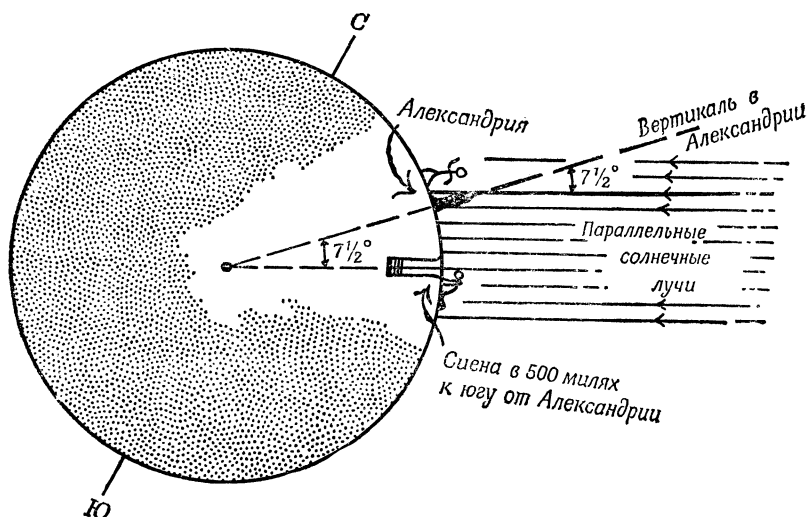
Размеры Земли

В первую очередь надо было определить размеры самой Земли, затем выразить другие величины через земной радиус.

Эратосфен (~235 г. до н. э.) произвел первые измерения размеров Земли. Он сравнил направление вертикали, проведенной к данному участку поверхности земного шара, с направлением параллельного пучка солнечных лучей в двух пунктах, отстоящих

друг от друга на известном расстоянии. Он предположил, что Солнце находится настолько далеко, что все солнечные лучи, достигающие Земли в данный момент, практически параллельны.

Эратосфену надо было проводить *одновременные* наблюдения в двух отстоящих друг от друга пунктах. Надежных часов, которые можно было бы сравнивать и переносить с места на место, у него не было, поэтому он обеспечивал одновременность наблю-



Фиг. 37. Определение размеров Земли по Эратосфену.

дений, выбирая полдень (когда Солнце находится в самом высоком положении) одного и того же дня в пунктах, расположенных на одной и той же долготе. Он проводил наблюдения в Александрии, где работал, и сравнивал их с наблюдениями, проводившимися некогда в Сиене¹⁾, в 500 милях южнее. Наблюдения в Сиене сводились к следующему: в полдень, 22 июня, солнечные лучи, падая в глубокий колодец, достигали воды и отражались вверх. Эратосфену было известно об этом из литературных данных. Отсюда следовало, что полуденное Солнце находилось в Сиене в этот день вертикально над головой наблюдателя. Эратосфен измерил

¹⁾ Современное название Асуан, где построена гигантская плотина на реке Нил.

в полдень того же дня длину тени, отбрасываемой обелиском в Александрии, и нашел, что направление солнечных лучей составляет $7\frac{1}{2}^\circ$ с вертикалью. Отсюда он заключил, что все солнечные лучи, падающие на Землю, параллельны. В этих опытах вертикали (радиус Земли) имели различные направления. Отсюда следовало, что радиусы Земли в Александрии и в Сиене пересекаются в центре Земли под углом $7\frac{1}{2}^\circ$. Если этот угол в $7\frac{1}{2}^\circ$ соответствует 500 милям на поверхности Земли, то скольким милям будут соответствовать 360° ? Остальное уже сводилось к простой арифметике. Измерить расстояние в 500 миль в те времена было трудно — вероятно, такие измерения производились военными, чеканившими шаг. Имеются сомнения по поводу единиц, которыми пользовался Эратосфен, но по некоторым сведениям его ошибка была меньше 5% — замечательный успех столь ранней попытки. Эратосфен пытался также определить расстояния до Солнца и Луны.

Размеры Луны и ее расстояние от Земли

Размеры Луны сравнивались с размерами Земли путем наблюдения лунных затмений. Отмечая время, в течение которого тень Земли пересекала Луну, Аристарх нашел, что диаметр тени, отбрасываемой Землей на Луну, в $2\frac{1}{2}$ раза больше диаметра Луны. Если бы Солнце представляло собой точечный источник света, находящийся на бесконечно большом расстоянии, то Земля отбрасывала бы от падающего на нее потока параллельных солнечных лучей тень, поперечное сечение которой равнялось бы поперечнику Земли. В этом случае мы имели бы:

$$\text{ДИАМЕТР ЗЕМЛИ} = 2\frac{1}{2} \cdot \text{ЛУННЫХ ДИАМЕТРОВ},$$

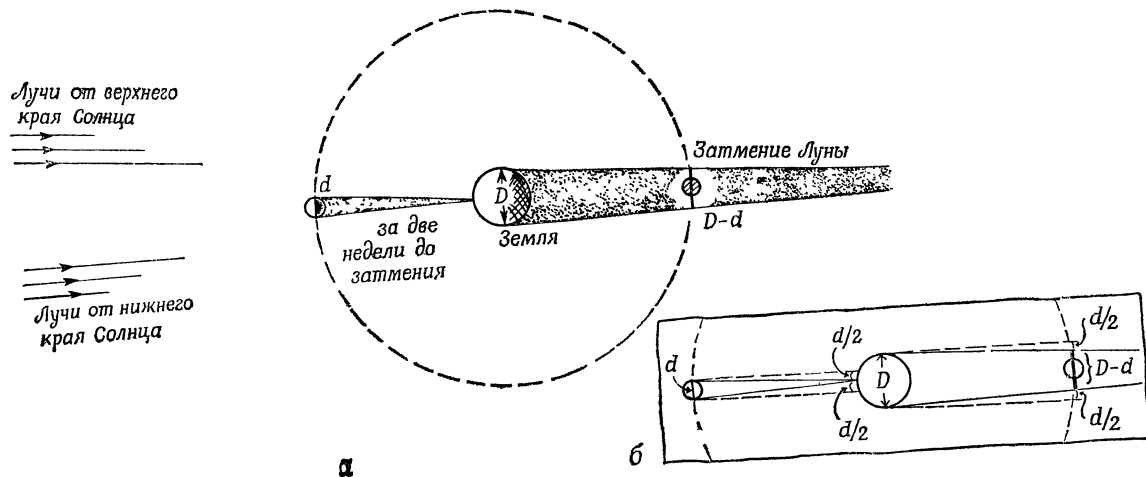
или

$$\text{ДИАМЕТР ЛУНЫ} = \frac{2}{5} \cdot \text{ДИАМЕТРА ЗЕМЛИ},$$

т. е.

$$\begin{aligned} \text{РАССТОЯНИЕ ОТ ЗЕМЛИ ДО ЛУНЫ, РАВНОЕ 110 ЛУНЫМ ДИАМЕТРАМ} &= \\ &= (\frac{2}{5}) \cdot 110 \text{ ЗЕМНЫХ ДИАМЕТРОВ} \\ &= 44 \text{ ЗЕМНЫМ ДИАМЕТРАМ, ИЛИ } 88 \text{ ЗЕМНЫМ РАДИУСАМ}. \end{aligned}$$

Отсюда следует, что если принять радиус Земли равным, согласно Эратосфену, приблизительно 4000 миль, то расстояние от Земли до Луны должно быть равно 350 000 миль. Предположение, что Солнце находится на бесконечности, представляется разумным, однако было бы неправильно считать его точечным источником, и Аристарх, конечно, это знал. Солнце — огромный пылающий шар,



Фиг. 38. Измерение размеров Луны (и, следовательно, расстояния до нее) древними греками.

Наблюдения затмений показали, что ширина тени, отбрасываемой Землей на Луну, равна 2,5 диаметра Луны. Однако тень Земли сужается по мере того, как увеличивается расстояние до Земли, потому что Солнце — не точечный источник. Тень Луны почти исчезает на расстоянии от Луны до Земли, поэтому тень от Земли должна сузиться на ту же величину (один лунный диаметр) на этом расстоянии. Следовательно, диаметр Земли должен равняться 3,5 лунного диаметра.

и поэтому тень от Земли (или другой планеты), на которую падает поток солнечных лучей, будет иметь коническую форму (с углом раствора $\sim 1/2^\circ$). При полном солнечном затмении Луна может лишь закрыть Солнце от наших глаз, причем конус лунной тени будет кончатся практически у Земли. На расстоянии от Луны до Земли тень от Луны суживается на целый лунный диаметр. При лунном затмении ширина земной тени, отбрасываемой на то же расстояние (от Земли до Луны), должна уменьшиться на ту же величину, т. е. на лунный диаметр. Аристарх рассуждал следующим образом:

ДИАМЕТР ЗЕМЛИ — ОДИН ДИАМЕТР ЛУНЫ = $2\frac{1}{2}$ ДИАМЕТРАМ ЛУНЫ,

т. е.

$$\begin{aligned}\text{ДИАМЕТР ЗЕМЛИ} &= (1 + 2\frac{1}{2}) \text{ ДИАМЕТРАМ ЛУНЫ} \\ &= 3\frac{1}{2} \text{ ДИАМЕТРА ЛУНЫ}\end{aligned}$$

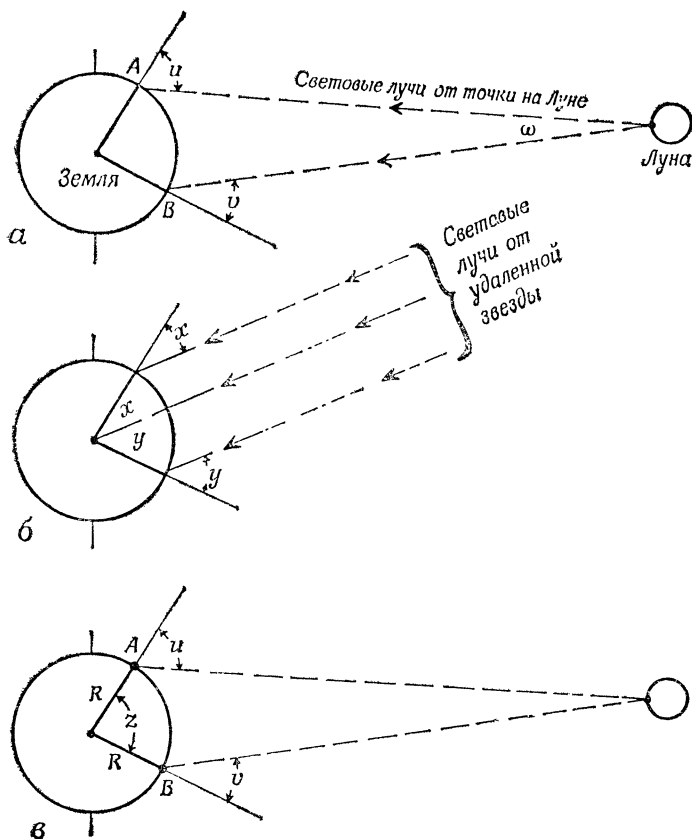
ИЛИ

$$\begin{aligned}\text{РАССТОЯНИЕ ОТ ЗЕМЛИ ДО ЛУНЫ} &= 110 \text{ ДИАМЕТРАМ ЛУНЫ} \\ &= \frac{2}{3} (110) \text{ ДИАМЕТРАМ ЗЕМЛИ} \\ &= 31,4 \text{ ДИАМЕТРА ЗЕМЛИ, ИЛИ} \\ &63 \text{ РАДИУСАМ ЗЕМЛИ.}\end{aligned}$$

Более точные измерения, выполненные Аристархом и его последователями, показали, что расстояние от Земли до Луны равно 60 земным радиусам (что с точностью до 1% совпадает с современными измерениями), т. е. около 240 000 миль.

Позднее расстояние от Земли до Луны было измерено следующим образом: наблюдатели на двух удаленных друг от друга пунктах, на одной долготе одновременно наблюдали Луну. Они измеряли угол между направлением, под которым была видна Луна, и между вертикалью в данной местности. Зная эти углы u и v , можно было определить положение Луны, если известно расстояние между пунктами. Большое расстояние измерить древним астрономам было трудно, но можно было воспользоваться вместо этого углом между радиусами Земли, соответствующими двум пунктам. Так что наблюдатель в каждом пункте измерял угол между местной вертикалью и тем направлением, под которым он видит определенную звезду. Для этой цели подходит Полярная звезда или любая другая, наблюдаемая в своей наивысшей точке. Как показано на фиг. 39, б, сумма двух измеренных углов $(x+y)$ дает угол z в центре Земли. На фиг. 39, в изображены три известных угла u , v , z ; известно также, что радиусы R равны. Чтобы найти расстояние от Земли до Луны, можно либо прибегнуть к тригонометрии, либо сделать в масштабе простой чертеж (фиг. 40) на большом листе бумаги (древние астрономы пользовались насыпанным на пол песком) — нарисовать круг и провести радиусы OA и OB , образующие угол z , равный сумме измеренных углов $x+y$. Нужно продолжить эти радиусы, чтобы они представляли вертикали в пунктах A и B . Из A следует провести линию до Луны AP , измерив угол u , который она образует с радиусом OA , а из B провести прямую BQ . Точка пересечения этих прямых M определяет положение Луны на диаг-

рамме. Измерив отрезок OM и разделив его на радиус OA , получим расстояние от Луны до Земли как кратное радиусу Земли.



Фиг. 39. Измерение расстояния от Земли до Луны.

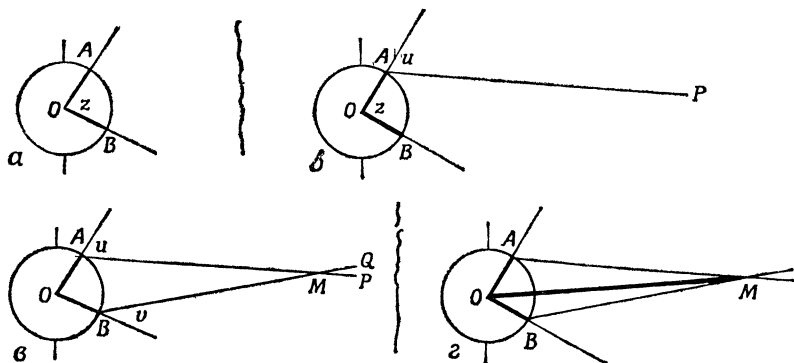
Точные измерения дают:

РАССТОЯНИЕ ОТ ЗЕМЛИ ДО ЛУНЫ=ОКОЛО 60 РАДИУСОВ ЗЕМЛИ
 $\approx 240\,000$ МИЛЬ.

Размеры Солнца и его расстояние от Земли

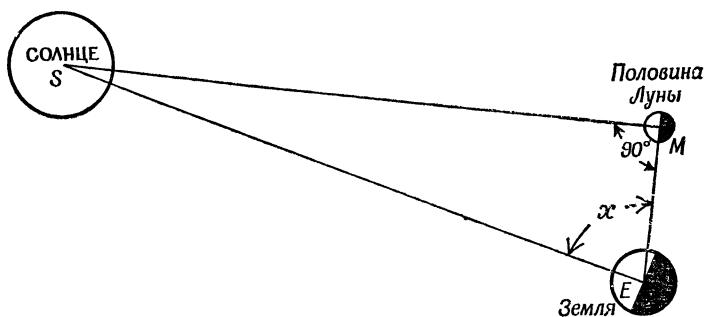
Расстояние от Земли до Солнца оценить гораздо труднее даже сегодня, ибо Солнце крайне ярко, велико и очень удалено от нас.

Угол между лучами зрения глаз при наблюдении Солнца слишком мал, чтобы его можно было измерить, не прибегая к телескопу. Однако Аристарх придумал остроумную схему, с помощью которой удалось, хотя и очень приближенно, оценить расстояние от



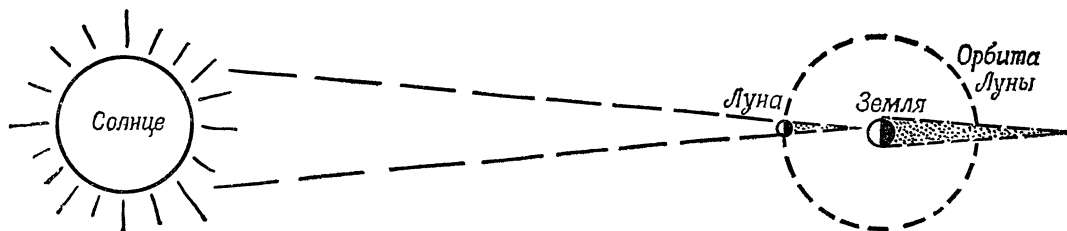
Фиг. 40. Вычисление отношения расстояния до Луны к радиусу Земли на основании измерений.

Земли до Солнца. Он наблюдал за Луной в той стадии, когда видна *точно* ее половина (фиг. 41). Солнечный свет должен падать на Луну под прямым углом к EM (направлению взгляда наблюдателя).



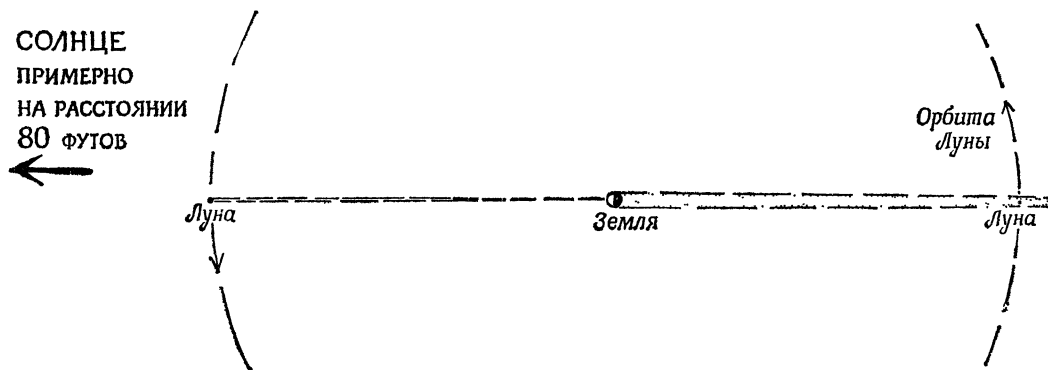
Фиг. 41. Расстояние от Земли до Солнца.

Определение расстояния от Земли до Солнца по известному расстоянию от Земли до Луны греческими астрономами. Они пытались измерить угол x (или SEM), который равен приблизительно 90° .



Фиг. 42. Солнце, Луна, Земля.

Чертеж дан не в масштабе. Солнце расположено слишком близко к Земле. Луна чрезмерно велика и расположена слишком близко к Земле.



Фиг. 43. Конусы теней Луны и Земли (в масштабе).

В этот момент наблюдатель измеряет угол между направлениями от Земли к Солнцу и от Земли к Луне. Этот угол, SEM , оказался почти (но не совсем точно) прямым. В большом треугольнике SEM два угла были известны. Третий малый угол, ESM , в основном и определяет расстояние от Земли до Солнца. Он получается вычитанием из 180° и очень мал: по оценке Аристарха он равен 3° , на самом же деле всего $1/6^\circ$. Поэтому вывод Аристарха о том, что расстояние от Земли до Солнца примерно в 20 раз больше, чем до Луны, был занижен приблизительно в 20 раз. Это соотношение (*расстояние до Солнца*)/(*расстояние до Луны*) получается от рассмотрения углов на чертеже соответствующего масштаба или с помощью очень простой тригонометрии (EM/ES — косинус угла SEM . Поэтому $ES/EM = 1/\cos \angle SEM$ легко находится из тригонометрических таблиц).

Таким образом, астрономам в Александрии были известны приближенные значения размеров небесной системы и этими значениями (с незначительными изменениями) пользовались астрономы в течение многих столетий:

Земля: радиус 4000 миль.

Луна: расстояние от Земли 60 земных радиусов, или 240 000 миль; собственный радиус 1100 миль.

Солнце: расстояние от Земли 1200 земных радиусов (это значение считалось неточным, каким оно и было); собственный радиус 44 000 миль.

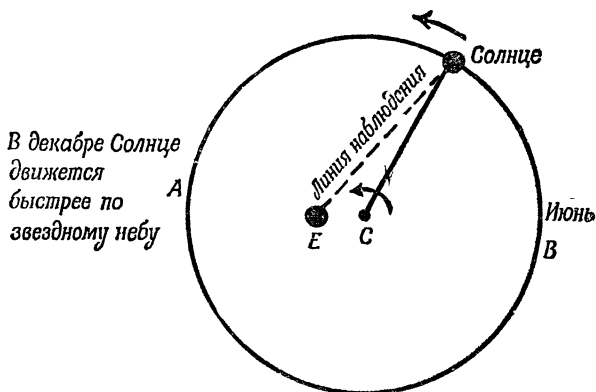
Планеты: расстояния до них были совершенно неизвестны, но предполагалось, что все они находятся дальше, чем Луна.

Звезды: расстояния до них также были совершенно неизвестны, предполагалось, что они находятся за Солнцем и планетами.

Из этих оценок видно, что на рисунках, иллюстрирующих затмения, обычно совершенно не выдержан масштаб. Фиг. 42 и 43 дают более близкие к действительности схемы, основанные на современных измерениях. Не удивительно, что затмения происходят столь редко. Призрачных конусов теней можно и не заметить. Орбита Луны наклонена под углом 5° к видимой траектории Солнца, поэтому затмения происходят еще реже.

Более поздние теории

Смелое предположение о том, что Земля вращается и движется вокруг Солнца, не было встречено благосклонно Александрийской школой. По-прежнему оставалось популярным представление о том, что Земля покоится и находится в центре мироздания, однако



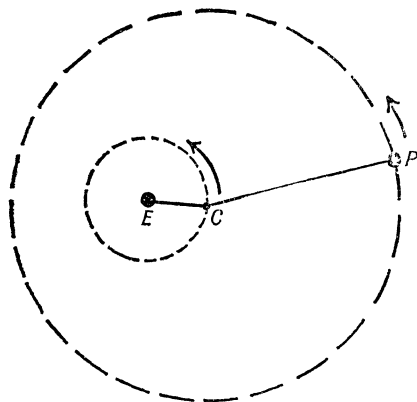
Фиг. 44. Схема эксцентрической орбиты Солнца.

Солнце движется по окружности, находясь на конце радиуса, который вращается с постоянной скоростью, как в простейшей системе сфер. Наблюдатель на Земле находится не в центре, поэтому движение Солнца ему кажется неравномерным, как в действительности и происходит — быстрее в декабре, медленнее в июне.

модель с вращающимися концентрическими сферами была слишком сложной. Не совсем равномерное движение Солнца по «орбите» можно было описать, используя эксцентрическую окружность: согласно этой модели, Солнце движется по такой окружности равномерно. Земля же неподвижна и находится не в центре круга, а на некотором расстоянии от него. При этом, если наблюдать за Солнцем с Земли, будет казаться, что оно движется быстрее в некоторые времена года (примерно в декабре, в точке А) и медленнее на 6 месяцев позднее (в точке В). Это была неплохая теория. Теория должна быть простой и основываться на простых допущениях¹⁾. Эти требования удовлетворялись: движение по окружности с постоянным радиусом происходило с *постоянной* скоростью. Это по-

¹⁾ Допущения, говоря на научном языке, должны быть *логичными*. Такая формулировка озадачила бы древних мыслителей. Они считали, что логическим должен быть *вывод* из допущений.

стоянство было необходимо с точки зрения древних греков, а фактически с точки зрения каждого методически мыслящего ученого. Без него теория превратилась бы в нечто бесформенное. Поместить Землю не в центре круга означало досадное *отклонение* от симметрии, но и скорость Солнца при этом оказалась несимметричной — наше лето продолжительнее зимы. Аналогичная схема была пригодна и для Луны, для планет же требовалась более



Фиг. 45. Схема эксцентрической орбиты планеты.

Каждая планета находится на конце радиуса, который вращается с постоянной скоростью; весь этот круг — центр, радиус и планета совершают один оборот в год вокруг эксцентрично расположенной Земли. Вообразим, что радиус CP продолжен и представляет собой ручку сковородки, сковорода совершает вращательное движение по кругу с малым радиусом EC , так как ее вращает вокруг E , как центра, домашняя хозяйка, которая хочет быстро растопить на ней кусок масла. Заставьте затем ручку CP тоже вращаться — очень медленно, как в случае внешней планеты, подобной Юпитеру.

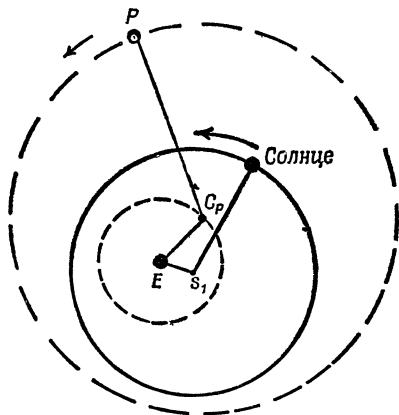
сложная схема. Каждая планета должна была равномерно двигаться по кругу, совершая полный оборот в течение собственного «года» вокруг неподвижной Земли, находящейся не в центре этого круга, а на некотором расстоянии от него, но тогда весь круг, *орбита планеты и центр круга* должны совершать полный оборот вокруг Земли за 365 дней. Таким образом, к основному вращению добавлялось еще одно (по окружности радиуса EC), в результате чего планета двигалась по эпициклоиде. На это движение накладывалось суточное движение всей звездной картины.

В другой схеме, приводившей к аналогичным результатам, вводился неподвижный главный круг (деферент) с радиальным плечом, вращающимся с постоянной скоростью. Конец плеча несет на себе малый круг (эпициклоиду). Радиус этого малого круга несет на себе планету, которая движется с постоянной скоростью, совершая один оборот за 365 дней. Хотя эти схемы оперируют с кругами, в них по-прежнему употребляли термин «сферы». В течение многих столетий астрономы привыкли рассматривать «движение небесных сфер», а сферы сами становились все более и более реаль-

ными по мере того, как восхищение греков чистой теорией уступало место детской настойчивости в поисках истины.

Больших успехов добился Гиппарх (~140 г. до н. э.), «один из величайших математиков и астрономов всех времен»¹⁾. Он был внимательным наблюдателем, создавал новые приборы и использовал их для определения положения звезд. Он составил звездный каталог, в котором дал классификацию звезд по их яркости и указал положение примерно тысячи звезд, пользуясь понятиями небесной широты и долготы. Насколько известно, Гиппарх создал первый небесный глобус. В те времена телескопов не существовало²⁾, единственным прибором был человеческий глаз. Для измерения углов служили простые приборы, подобные циркулю. Тем не менее Гиппарх измерял углы с точностью $1/6^\circ$. Гиппарх был создателем сферической тригонометрии, он применил ее для исследования Солнца и Луны. Он показал, что эксцентрические круги и эпициклы эквивалентны с точки зрения описания небесных движений. Добавляя собственные наблюдения к наблюдениям древних греков и вавилонским записям, он разработал системы эпициклов Солнца и Луны. Прodelать то же для планет оказалось труднее из-за отсутствия точных данных, и он приступил к новым измерениям.

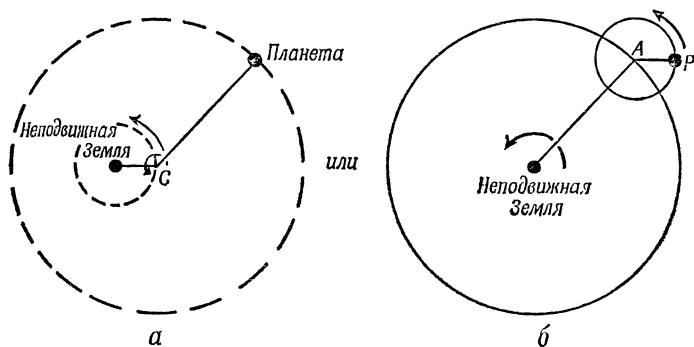
Исходя из наблюдений греков, сделанных за 150 лет до него, Гиппарх открыл очень малый, но играющий очень важную роль, астрономический сдвиг: «прецессию равноденствий». Во время весеннего равноденствия между зимой и летом Солнце находится



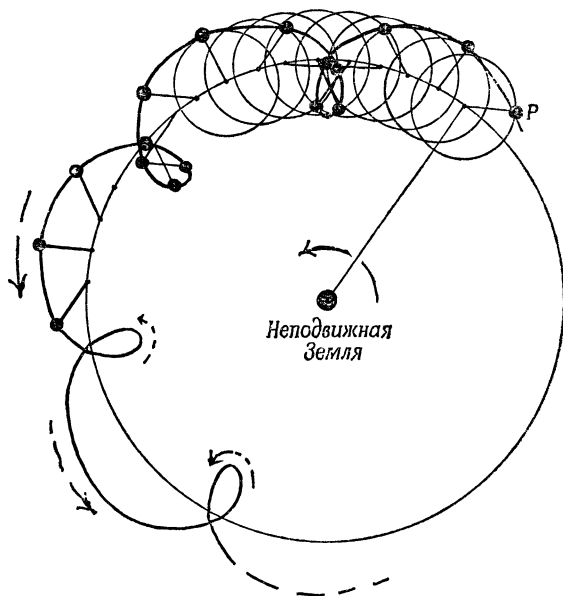
Фиг. 46. Схема эксцентрических орбит.
Показаны орбиты Солнца и планеты Р.

¹⁾ G. S a r t o n, A History of Science, цит. выше.

²⁾ Это изобретение было сделано на семнадцать столетий позже. Увеличивая рассматриваемый участок неба, телескоп дал возможность производить значительно более точные измерения.



Фиг. 47. Схема эксцентрических орбит и схема эпициклов.
 а — точка C и круг с радиусом орбиты планеты вращаются вокруг неподвижной Земли; б — Земля остается неподвижной в центре главного круга (деферент).

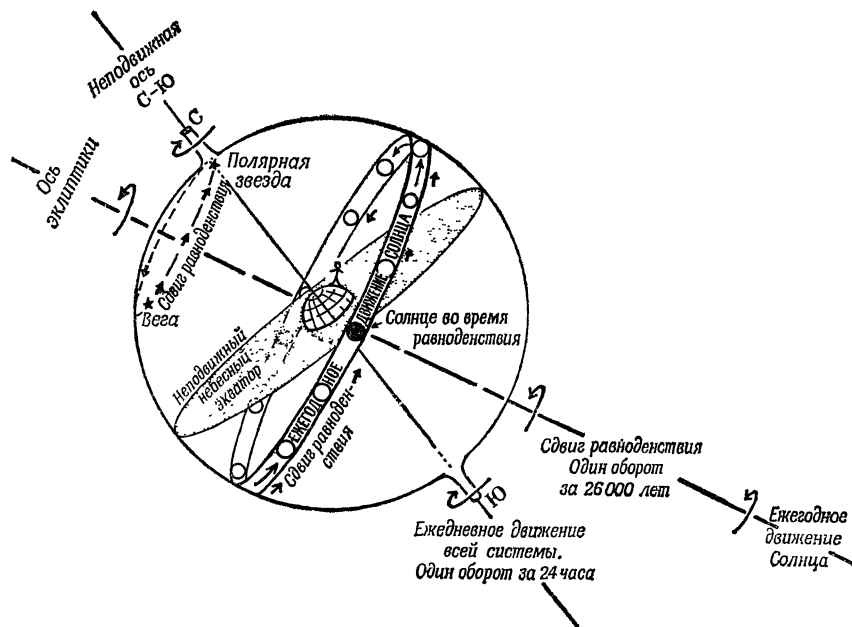


Фиг. 48. Траектория планеты в схеме эпициклов.
 При комбинации двух круговых движений получается эпициклоида, по которой движется планета.

в определенном месте зодиака и возвращается в это положение каждый год. Гиппарх обнаружил, что во время следующего весеннего равноденствия Солнце находится не точно в том же участке звездного неба. Оно попадает в тот же участок неба приблизительно на 20 минут позднее; таким образом, в момент, соответствующий равноденствию, Солнце находится еще на пути к данному участку неба, приблизительно на $1/70^\circ$ ближе через год и почти на $1\frac{1}{2}^\circ$ — по прошествии столетия. Гиппарх обнаружил это явление по разным значениям долготы звезд в старых и новых записях. Долготы отсчитывались вдоль зодиака от весеннего равноденствия, т. е. от того места, где экватор пересекает эклиптику. Так как все долготы изменялись на один или два градуса за столетие, Гиппарх сделал вывод, что пояс зодиака смещается с этой скоростью по небесной сфере, увлекая с собой все звезды, тогда как небесный экватор и Земля остаются неподвижными¹⁾. Это движение кажется незначительным — его период составляет 26 000 лет, однако оно существенно для астрономических измерений и всегда учитывалось со времени открытия его Гиппархом. Само это открытие знаменовало вершину успеха наблюдений.

Прецессию было трудно наблюдать, пока Коперник, спустя 16 столетий, не упростил задачу, рассмотрев ее совершенно с иной точки зрения (см. гл. 16). Но и тогда она оставалась необъясненной и вне связи с другими небесными явлениями, пока Ньютон не нашел простого объяснения. Открытая как некий загадочный сдвиг, прецессия превратилась в признак тяготения.

¹⁾ Эклиптика, по которой движется Солнце, пересекает небесный экватор в двух точках. Когда Солнце достигает одной из них, она симметрична по отношению к земной оси. День и ночь равны для всех частей земного шара: наступает равноденствие. Прецессия — это медленное вращение всей небесной сферы, включая зодиак и Солнце, вокруг *оси эклиптики*, перпендикулярно ее плоскости. От столетия к столетию сдвиг прецессии приводит к тому, что к точкам равноденствия приходят разные участки 'зодиакального пояса (в которых эклиптика пересекает экватор). Вся небесная сфера участвует в этом медленном вращении вокруг оси эклиптики. Это применимо, например, к звездам, находящимся вблизи оси, проходящей с севера на юг, которая скреплена с Землей и образует с осью эклиптики угол $23\frac{1}{2}^\circ$; это движение увлекает Полярную звезду в сторону от оси, проходящей с севера на юг, и приносит с течением времени в этот участок неба другую звезду. Таким образом, в течение нескольких столетий в положении, соответствующем Полярной звезде, наблюдается яркая звезда, а в течение других столетий в этом месте в звездной картине будет пробел — звезда наблюдаться не будет. В течение сорока с лишним столетий, за период, прошедший от строительства пирамид до наших дней, накопился довольно значительный сдвиг. Исследуя туннели в пирамидах, построенные для наблюдения Сириуса в полночь в весеннее равноденствие, мы можем приближенно оценить, когда были построены сами пирамиды.



Фиг. 49. Прецессия равноденствий.

В дополнение к суточному движению всего небесного свода вокруг оси, проходящей с севера на юг, и ежегодному движению Солнца по его эклиптическому пути в зодиаке Гиппарх открыл медленное вращение всей звездной картины вокруг оси эклиптики (перпендикулярной к зодиаку).

Гиппарх оставил потомству прекрасный звездный каталог, схемы эпициклов и результаты наблюдений планет — бессмертный памятник астроному. Но все эти достижения вынуждены были лежать втуне два с половиной столетия, пока великий математик Птолемей не создал на их основе стройную теорию.

Птолемей (~120 г.) произвел «критическую переоценку наблюдений движения планет». Он собрал работы Гиппарха и его предшественников, добавил свои собственные наблюдения, создал первоклассную теорию и оставил великолепное изложение всей совокупности накопленных астрономических знаний, которая в течение последующих четырнадцати столетий играла решающую роль в астрономии. Положения Солнца, Луны и планет по отношению к неподвижным звездам были нанесены Птолемеем на карту, причем углы были измерены с точностью до доли градуса. Он смог поэтому разработать систему эксцентрических хрустальных сфер и эпициклов, которая не только была так усовершенствована, что точно описывала движение светил в прошлом, но с успехом позволяла предсказывать их будущие положения. Птолемей создал великолепный *математический* аппарат, основанный на простых принципах, способный на протяжении веков предвосхищать явления. При этом он не рассматривал хрустальных сфер, а концентрировал свое внимание на вращающемся радиусе, (или «спице»), на конце которого находилась планета и который, вращаясь, как бы увлекал ее за собой. Он изложил всю свою систему движения светил — Солнца, Луны и планет — в трактате под названием «*Альмагест*».

Птолемей создал следующую картину: звездное небо — это сфера, вращающаяся вокруг неподвижной оси и совершающая полный оборот за 24 часа; Земля должна оставаться в центре небесной сферы, в противном случае звездная картина должна обнаруживать параллакс. Земля — это сфера, которая должна покоиться и тому есть ряд причин: если бы Земля двигалась, предметы, брошенные вверх, должны были бы отставать от нее. Солнце движется вокруг Земли согласно простой эпициклической схеме Гиппарха; Луна движется по более сложной эпициклоиде.

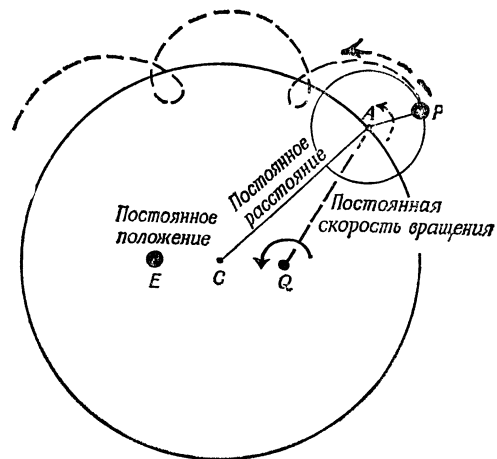
Исследуя «пять блуждающих звезд» — планеты, Птолемей обнаружил, что не может описать их движение простой эпициклоидой. Между теорией и наблюдением существовали расхождения. Он попытался создать схему эпициклов, в которой Земля находилась бы не в центре главного круга, а была бы несколько сдвинута относительно него, т. е. расположена эксцентрично.

Этого оказалось недостаточно, и Птолемей построил схему, в которой не только расположил Землю эксцентрично, но и сдвинул центр равномерного вращения в противоположную сторону. Он предложил схему, приведенную на фиг. 50, которая успешно описывала движения Солнца, Луны и планет. В его схеме C — центр главного круга, E — Земля, расположенная эксцентрично; Q — точка, находящаяся на таком же расстоянии от C по другую сторону ($QC = CE$). Плечо QA вращается с постоянной скоростью вокруг Q , описывая равные углы за равные промежутки времени и неся на себе центр A маленького круга, эпицикла, который движется таким образом по главному кругу. Радиус эпицикла AP и, следовательно, планета P , вращается с постоянной скоростью. Это была отчаянная, но успешная попытка подтвердить справедливость схемы кругов, вращающихся с постоянной скоростью. Птолемей был вынужден считать, что плечо главного круга также вращается с постоянной скоростью. Этим плечом не мог быть проведенный из центра радиус, как в простой эпициклической схеме. Им не мог также быть и радиус, проведенный из точки E . Но можно было спасти положение, взяв плечо, проведенное из равноудаленной точки Q , вращающейся с постоянной скоростью. Таким образом, для главного круга каждой планеты имелись три точки, расположенные близко друг к другу, каждая с характерными свойствами:

E	C	Q
Земля (неподвижная)	Центр главного круга с плечом CA постоянной длины	Равноотстоящая точка с плечом QA , вращающимся с постоянной скоростью

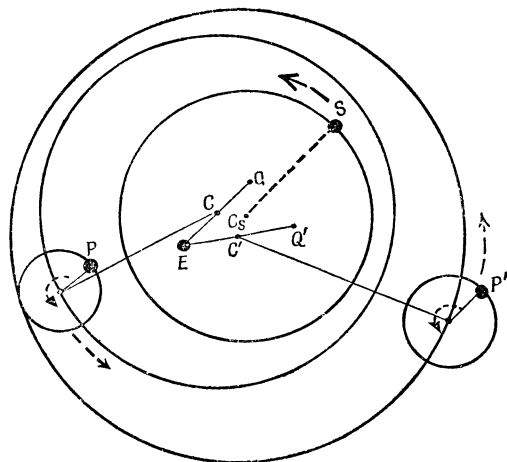
Подбирая подходящие радиусы, скорости вращения и расстояние EC ($=CQ$), Птолемей смог составить схему для всех планет (для Меркурия потребовался еще один дополнительный круг). Для каждой планеты главному кругу придавался различный наклон и сам эпицикл имел наклон по отношению к главному кругу.

Это была сложная система главных и вспомогательных кругов с различными радиусами, скоростями, наклонами и эксцентриситетами различной величины и направлений. Эта система, работающая подобно сложному передаточному механизму, позволяла из года в год точно предсказывать положения планет и определять эти положения в прошлом. Подобно хорошей системе механизмов, она была основана на простых принципах: круги с постоянными радиусами, вращение с постоянной скоростью, симмет-



Фиг. 50. Система Птолемея.

Эта система очень точно описывает движения Солнца, Луны и планет.



Фиг. 51. Система Птолемея для Солнца S и двух планет P и P' .

E — неподвижная Земля; C — центр круга; Q — равноудаленная точка $QC=CE$.

рия эквантов (равноотстоящих от центра точек: $QC = CE$), постоянные наклоны кругов¹⁾ и неподвижная Земля.

В «Альмагесте» Птолемей подробно описал схемы для каждой планеты и дал таблицы, по которым можно было определить движение каждого небесного тела. Книга была скопирована (разумеется, от руки), переведена с греческого на латинский, арабский и затем опять на латинский, по мере того как культура продвигалась на Восток, а затем опять в Европу. Существуют современные печатные варианты этой работы с переводами. Книга эта в течение столетий служила руководством для астрономов и справочником для мореплавателей. На основе содержащейся в ней информации развивалась астрология — специфическое скопление человеческих страхов, надежд, стремлений к наживе, которая нуждалась в подробных сведениях о положениях планет.

Схема Птолемея была эффективной и достаточно разумной. Мы можем сказать то же самое о нашей современной атомной и ядерной физике. Истинны ли эти теории? И древние греки, и современные ученые стали бы возражать против такой постановки вопроса; однако если бы вы предложили более простую и более плодотворную теорию, они приветствовали бы ее.

Задача

Опишите своими словами и расскажите, используя диаграммы, о методе, применявшемся греками для определения

- а) радиуса Земли;*
- б) расстояния от Земли до Луны;*
- в) расстояния от Земли до Солнца.*

¹⁾ Если эта настойчивость при подборе кругов покажется вам искусственной, то вспомните, что:

А) ваши современные знания построены на том, что вам известно от других;

Б) хотя эта модель кажется в настоящее время нереальной, она пригодна как метод анализа.

Добавление одного круга к другому в греческой астрономии соответствует применению гармонического ряда (проекции круговых движений) для анализа сложных движений. Физики применяют в настоящее время такой «фурье-анализ», исследуя периодическое движение: анализируя звуки, предсказывая приливы и отливы, описывая поведение атома. Любое периодическое движение, каким бы сложным оно ни было, можно выразить в виде суммы простых гармонических движений. Каждое круговое движение в схеме Птолемея дает две такие компоненты — вверх и вниз, вправо и влево. Концентрические сферы Евдоксия можно также рассматривать как подобный анализ, но более сложный. С помощью той или другой схемы можно описать движение планет с любой точностью, если воспользоваться достаточным количеством компонент.

[Архангел Рафаил обсуждает с Адамом различные взгляды на строение Вселенной.]

.....
Что было бы, если б дневное светило
Стояло в середине всей зримой вселенной,
А звезды другая, свершая движенье,
Вращались кругом в направленьях различных?
Ты видишь теперь, как свершают движенье
Шесть первых планет в их теченьи неравном,
То в выси, то низко, то двигаясь скрытно,
То выдавшись, или ж стоят неподвижно,
Что ж было бы, если б седьмая планета,
Земля, представляясь тебе неподвижной,
Имела б тroyакого рода движенье?

Джон Милтон, Потерянный рай,
книга VIII, 1667 г.¹⁾

Такой была созданная Птолемеем картина строения Вселенной — сложной, неуклюжей системой; однако долгое время ею с успехом пользовались. Вам она может показаться неестественной и даже немыслимой, но Птолемею и многим после него невероятной казалась противоречащая ей схема, согласно которой Земля вращается вокруг Солнца. Ведь *если Земля движется, то предметы будут сбрасываться с нее при вращении или отставать от нее при движении*. Ближайшие из неподвижных звезд должны менять свои видимые положения при движении Земли по орбите в течение полугода.

Наивным представлениям о природе движения суждено было дожидаться учения Галилея и ясного мышления Ньютона, чтобы рассеялся туман первого возражения. Второе возражение оставалось бы в силе, если бы звезды не обнаружили никаких параллаксов. Мы знаем теперь, что параллаксы существуют, но они слишком малы и их нельзя наблюдать без достаточно точных приборов, и первые успешные наблюдения были проведены в

¹⁾ Перевод С. И. Писарева, 1871.

1832 г. Упомянутые выше возражения против гелиоцентрической гипотезы отступали на задний план перед еще одним возражением, которое возникало, казалось, естественным образом из человеческой психологии, из свойственного человеку эгоцентризма. Земля, на которой Мы живем, должна быть центром Вселенной — другие небесные тела должны вращаться вокруг Нас¹⁾. Эта точка зрения, подкреплённая наблюдениями, легко находила поддержку как в наивном эгоцентризме, так и в учениях греческих философов. Поэтому мы не должны удивляться тому, что система Птолемея, согласно которой Земля с живущими на ней людьми являлась центром Вселенной, считалась правильной на протяжении всего средневековья, пока с наступлением эпохи Возрождения людей, мышление которых становилось все более гибким и пытливым, не стали тревожить различные вопросы.

Точка зрения, согласно которой не Солнце вращалось вокруг Земли, а Земля вокруг Солнца (гелиоцентрическая система), высказывалась некоторыми греческими астрономами и обсуждалась на протяжении нескольких веков (с XII по XV) то тем, то другим философом или священнослужителем как нереальная теория и не встречала сколько-нибудь значительной поддержки. В систему Птолемея верили и считали ее единственно правильной на протяжении примерно тысячи лет. Население Европы интересовалось наукой только как базой для словесных дискуссий; новые принципы получали права гражданства не на основе экспериментальных данных, а благодаря логическим умозаключениям, опиравшимся на авторитетные источники. Влияние церкви все возрастало, просвещение всецело зависело от нее, наука тоже на-

¹⁾ Подумайте немного, прежде чем осудить столь дерзкую точку зрения. Вам тоже не было в свое время чуждо такое отношение к окружающему. В наше время люди вначале думают примерно так: «Я — важная особа, пожалуй самая важная, весь мир вертится вокруг Меня». В процессе дальнейшего развития поле зрения становится более широким, проходя, вероятно, следующие стадии: «Я»; «Я и мама»; «Я и моя семья»; «Я и другие»; «Я и мой народ», и, наконец, для немногих, «Я и Вселенная». Большинство людей не проходит через все это. Успехи человека в его общественной деятельности и интеллектуальном развитии, казалось бы, должны зависеть от того, сколько перечисленных стадий ему удалось пройти. Многим не удастся продвинуться дальше первых двух-трех, и, хотя они могут добиться большого благополучия, вряд ли их интеллектуальные возможности, их духовный мир вызовут наше восхищение. Некоторые диктаторы мирового масштаба остановились на первой стадии «Я», а иные дошли даже до стадии «Я и мама», но не дальше. Другая крайность — те редкие личности, которые думали и чувствовали в соответствии со стадией «Я и Вселенная»; это были великие философы и пророки.

ходила в во власти ее догм. Любые диспуты, даже простой призыв к эксперименту, к проведению каких-либо наблюдений, могли бы вызвать к жизни ряд волнующих вопросов, угрожавших непреложности установленных церковью законов. В те времена, когда церковь повседневно направляла и наставляла простой народ, а короли и дворянство управляли с ее помощью, такого рода покушения на рутину встречались в штыки.

В течение десяти веков со времени создания греческой астрономии до первых научных экспериментов возникали те или иные теории, но работы этих ученых остались неизвестными. После многовекового темного царства средневековья забрезжил свет. Английский монах Роджер Бэкон (~1250 г.) стал взывать о необходимости проведения экспериментов. Он был честным и горячим человеком, нападал на священников и философов, настаивал на том, что накапливать знания необходимо на основе фактов, а не корпеть над скверными латинскими переводами. В своих книгах он клеймил невежество и предрассудки, призывая людей: «Перестаньте подчиняться догмам и авторитетам; *взгляните на мир!*» Его резкое поведение послужило причиной конфликта с его собратьями монахами и с церковью. Учение Роджера Бэкона, по всей вероятности, было под запретом, а его книги, как и книги его единомышленников, на долгое время были забыты. Бэкон на столетия опередил свое время. (Жившему много позднее Фрэнсису Бэкону приписывали новый подход к науке. Однако вряд ли его вклад был более значителен.)

Двумя столетиями позже появился Леонардо да Винчи (~1480 г.) — великий художник, мыслитель и ученый. Занимаясь механикой, он классифицировал понятия массы, силы, движения, он высказал новые научные представления и создал искусные модели. Его знаменитые заметки являются сокровищницей изобретений в области механики и едва ли не самых прекрасных в истории искусства рисунков. Составляя эти заметки, он выступал как в роли историка, так и в роли пророка, занося в них интересные идеи, свои и чужие, и остроумные схемы, которые он придумывал. Это было началом нового подхода к науке, того, о котором мечтал Роджер Бэкон.

Тем временем накапливались астрономические данные, в том числе наблюдения арабских астрономов и др. Нужды медицины и мореплавания дали толчок развитию науки в эпоху Возрождения. Альфонсо X, Кастильский (~1260 г.) приказал своей школе навигаторов составить новые таблицы для предсказания движений небесных тел. Эти таблицы были составлены, отпечатаны лет

через 200, и ими пользовались еще сотню лет. Ходили слухи, что когда Альфонсо Кастильскому впервые объяснили сложную систему Птолемея, он сказал, что если бы при сотворении мира посоветовались с ним, он сделал бы все значительно проще и лучше.

Ученые провели дополнительные измерения, и система Птолемея была усовершенствована с математической точки зрения, но даже в эпоху раннего Возрождения гелиоцентрическая гипотеза не рассматривалась серьезно до тех пор, пока Коперник не написал свою знаменитую книгу. Через все времена с эпохи Возрождения и до наших дней великая плеяда ученых создавала механику от туманных средневековых воззрений до современного состояния точной и совершенной науки, используя при этом Солнечную систему (а позднее атом) как огромную лабораторию, в которой отсутствует трение. Нас интересуют не только достижения этих ученых в области физики, но и взаимоотношение их деятельности с жизнью и воззрениями других людей. Поэтому мы дадим не только описание их деятельности, но и краткие биографии. Сначала приведем краткие справки, демонстрирующие вклад каждого из них в науку. (В этих характеристиках, как и прежде, мы указываем не даты рождения или смерти, а те годы, когда данному лицу было около 40 лет.)

Николай Коперник (~1510 г.). Предполагал, что гелиоцентрическая система планет проще птолемеевой. Написал большую книгу, в которой подробно обосновал такую систему, вычислил ее размеры и прочее. После его смерти эта точка зрения получила дальнейшее распространение и развитие, но еще долгое время не была общепризнанной.

Тихо Браге (~1580 г.). Горя желанием узнать как можно больше о планетах, стал блестящим наблюдателем, гениальным изобретателем точных приборов. Построил первую большую обсерваторию. Знал о гипотезе Коперника, но не принимал ее целиком; не особенно увлекался теорией. Составил значительно более точные таблицы планет, чем те, которые существовали до него, их впоследствии дополнил и опубликовал Кеплер.

Иоганн Кеплер (~1610 г.). Прекрасный математик, обладавший тонкой научной интуицией и твердой верой в то, что в основе явлений природы лежат простые правила. Пользуясь наблюдениями своего учителя Тихо Браге, вывел три основных закона движения планет. Однако не смог дать надлежащего объяснения этим законам.

Галилео Галилей (~1610 г.). Провел эксперименты и создал научные основы механики и астрономии. К ужасу классических философов, пренебрегая грозившей ему лично опасностью, провозгласил необходимость твердо держаться эксперимента. С помощью изобретенного им телескопа подтвердил правильность теории Коперника, которую страстно защищал, пока не стал жертвой инквизиции.

Рене Декарт (~1640 г.). Этот французский философ описал картину строения Вселенной, выведенную из общих принципов, которые, по его мнению, созданы богом. Возражал против представления о вакууме и считал, что пространство заполнено вращающимися вихрями, увлекающими за собой планеты. Величайшим вкладом в науку явилось введение в геометрии прямоугольной системы координат: применение графиков позволило связать алгебру с геометрией; заложил основы дифференциального исчисления.

Начиная с XVII века создавались большие научные общества для обмена знаниями и стала свободно развиваться наука, основанная на экспериментах.

Исаак Ньютон (~1680 г.). Собрал результаты, полученные до него Галилеем и другими учеными, и сформулировал «законы», суммирующие экспериментальные факты и связывающие массу, движение и силу. Развил понятие силы тяготения, установив закон всемирного тяготения, согласно которому все тела притягиваются друг к другу с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними; показал, что на основе этого закона можно объяснить движение Луны, три закона Кеплера, приливы и отливы и т. п. Таким образом построил великую дедуктивную теорию. В ходе этого ему пришлось в качестве математического аппарата создать основы дифференциального исчисления. Проводил эксперименты и создавал теории и в других областях физики, особенно в оптике.

В течение следующих двух столетий теория тяготения разрабатывалась математиками и физиками, в том числе французскими математиками *Жозефом Лагранжем* и *Пьером Лапласом*; по очень незначительному гравитационному действию на другие планеты была открыта новая планета.

Альберт Эйнштейн в начале этого столетия предложил видоизменить и иначе интерпретировать законы механики. Эти изменения, не разрушая представлений Ньютона, позволили объяснить, например, непонятное ранее малое движение перигелия планеты Меркурий или же поведение очень быстро движущихся атомов. Теория относительности не только изменила «рабочие правила» механики; ее огромное значение в том, что она бросает свет на соотношение между экспериментом и теорией, объясняя многие факты, остававшиеся ранее непонятными даже для самых выдающихся ученых.

«Красота — это истина, истина — это красота, — вот все, что Вы знаете на Земле, и все, что Вам надо знать».

Джон Китс

Николай Коперник родился в польской Пруссии. Насколько известно, жизнь он вел спокойную, небогатую событиями. Был религиозен, способностями обладал не столь уж блестящими, но его вдохновляла любовь к истине. У него был четкий взгляд на вещи и достаточно храбрости, чтобы не побояться бросить вызов укоренившимся традициям, хотя он отнюдь не жаждал входить в конфликт с хранителями этих традиций — церковью и государством.

Коперника воспитывал дядя, влиятельный Фрауэнбургский епископ. Дядя хотел его направить по собственным стопам и решил за него его судьбу. Сначала он послал его в школу, а затем в Краковский университет. Наряду с другими предметами в университете Коперник изучал и астрономию и научился обращению с неуклюжими астрономическими приборами того времени. Затем он путешествовал по Италии, изучал греческий язык и церковное право, за что получил степень доктора. Астрономию он продолжал изучать, имея уже возможность читать оригинальные греческие тексты. Спустя несколько лет (двадцати шести лет от роду) он посетил Рим и прочел там курс лекций по математике (а возможно, и по астрономии?). Тем временем дядя добился в 1497 г. избрания его каноником в кафедральном соборе и дал разрешение провести еще два года в Италии для изучения медицины и церковного права. И вот Коперник в возрасте тридцати с небольшим лет вернулся на родину. Там он и провел остаток жизни, отдавая свое время церковным обязанностям, ведению бухгалтерских церковных книг (практически он вел все хозяйство капитула), случайным медицинским консультациям и размышлениям о том, как устроена Вселенная.

Он любил одиночество и, по-видимому, имел немного друзей, хотя репутация его как ученого привлекла к нему ряд учеников.

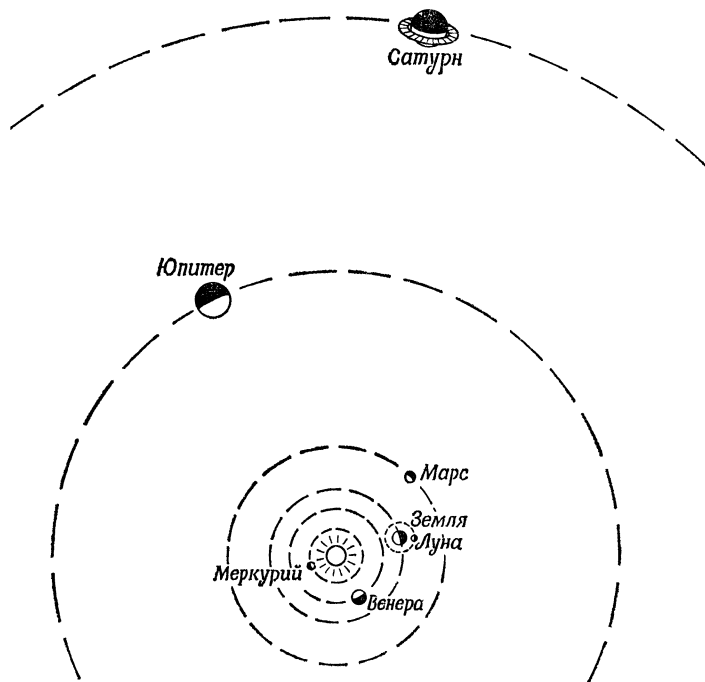
Он не любил принимать участие в долгих дискуссиях, которые в те времена были очень распространены; однако когда к нему обратились с просьбой помочь государственной комиссии упростить монетную систему, он охотно принял в этом участие и представил четкий и толковый проект, который и был принят сенатом.

Коперника интересовали разнообразие и противоречивость мнений о движении планет. Система Птолемея казалась ему слишком неуклюжей, он считал, что бог, создавая Вселенную, мог придумать что-нибудь получше. Он верил в то, что планетная система, сферы и прочее были сотворены богом, но считал, что созданная богом система должна быть простой и величественной именно благодаря своей простоте. Он собрал наблюдения над движением планет и составил таблицы, значительно более надежные, нежели существовавшие до него; размышляя над движениями планет, он был поражен тем, насколько проще стала бы система Птолемея, если бы ее центром являлось Солнце. Основываясь только на интуиции, он предположил, что Земля — такая же планета, как и все остальные. Это уже было переворотом в существовавших тогда представлениях. Он предположил, что все планеты движутся по круговым орбитам вокруг неподвижного Солнца, и пришел к выводу, что Земля обходит Солнце за год, вращаясь при этом вокруг своей оси и совершая полный оборот за 24 часа. Тогда «неподвижные звезды» и Солнце могли, по его мнению, покоиться в небе.

Эта схема заменила эпициклы Птолемея простым круговым движением. Суточное движение звезд, увлекавшее за собой Солнце, Луну и планеты, очевидно, можно было заменить суточным вращением Земли. Эта возможность обсуждалась, но была отвергнута, так как механизм подобного движения был непонятен. (Считалось, что при вращении Земли было бы слышно завывание ветра, создаваемого потоком воздуха, и что при падении камня с высокой башни участок, на который должен был камень упасть, уходил бы из-под него. С другой стороны, звезды и другие небесные тела могли совершать вращение по сферам Птолемея, так как сферы и вращения считались присущими небесам.)

По мнению Коперника, сложные, неравномерные движения Солнца и планет на фоне звездного неба можно было значительно упростить, предположив, что Солнце неподвижно, а планеты вращаются вокруг него. Основной вклад Коперника в астрономию заключается именно в том, что он «остановил» Солнце и поместил его в центр планетной системы. Тогда стало очевидно, что ежегодное движение Солнца по эклиптике — лишь кажущееся; оно обусловлено вращением Земли вокруг Солнца. Сложное движение планеты

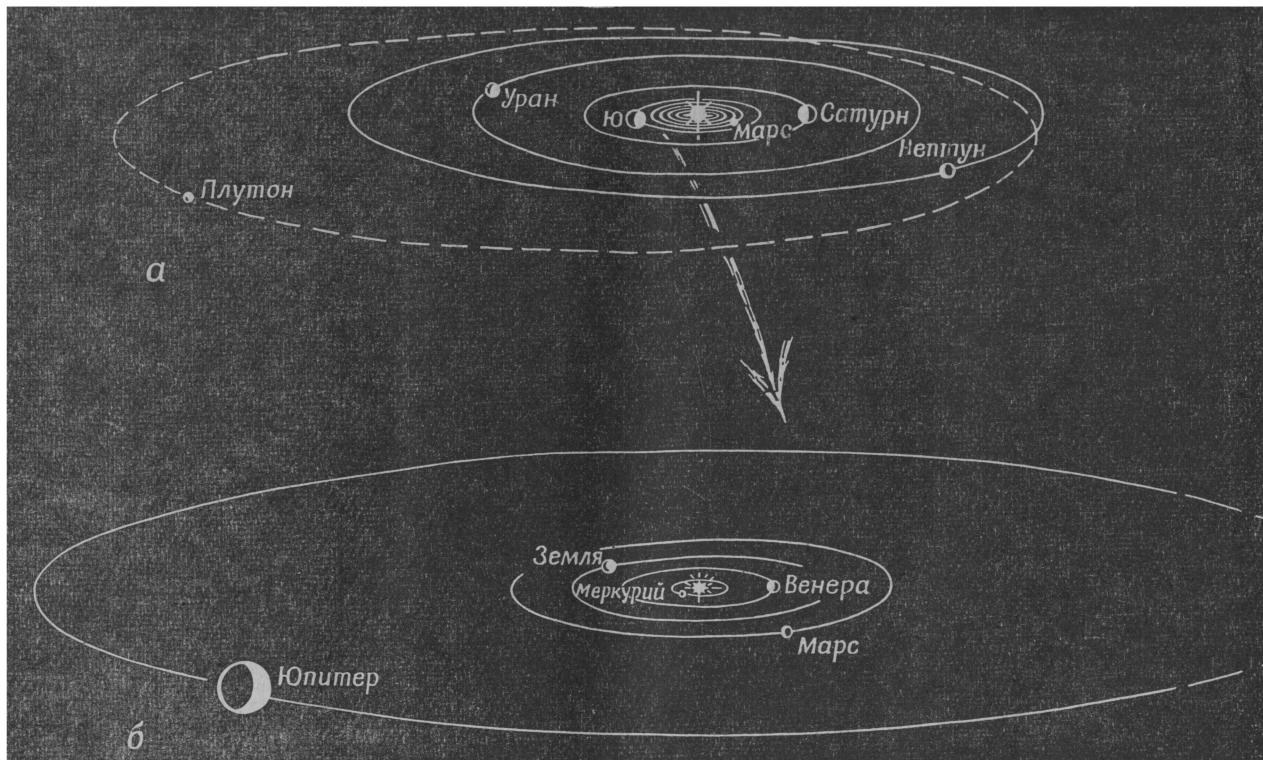
по эпициклоиде складывается из собственного движения планеты по кругу и движения Земли вокруг Солнца. (С этой точки зрения система эпициклов являлась как бы расплатой за то, что ранее не было известно о движении Земли.) Такое соблазнительное представление о планетной системе, в центре которой находится Солнце, существовало и ранее, но оно не встречало сколько-нибудь



Фиг. 52. Система Коперника.

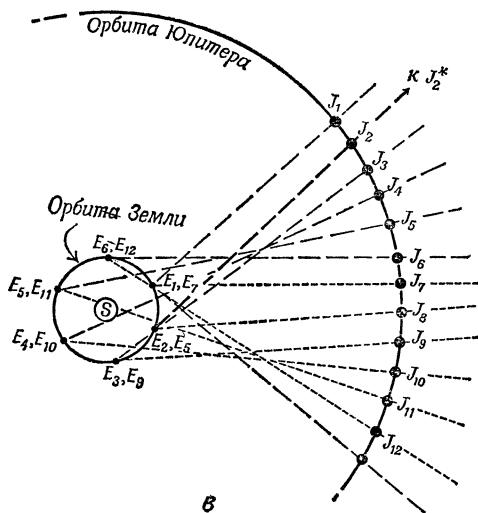
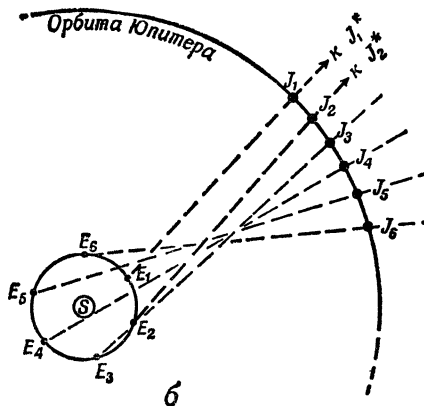
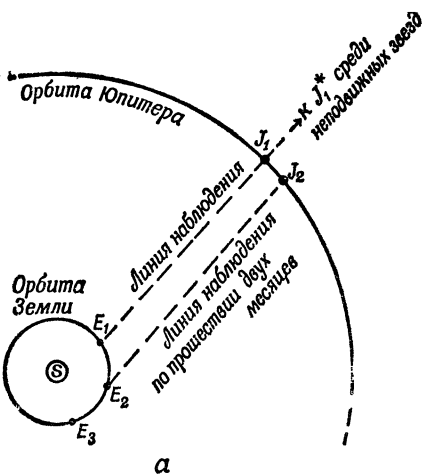
значительной поддержки. Коперник, исследовавший подобные идеи в старых записях, обладал не только ясным умом, но и огромным количеством экспериментальных данных для их дальнейшего развития.

Движение планеты по эпициклоиде Коперник объяснял следующим образом. Предположим, что Земля вращается вокруг Солнца по круговой орбите, а Юпитер также вращается вокруг Солнца, но более медленно и по орбите большего радиуса (фиг. 54).



Фиг. 53. Система Коперника с более поздними добавлениями.

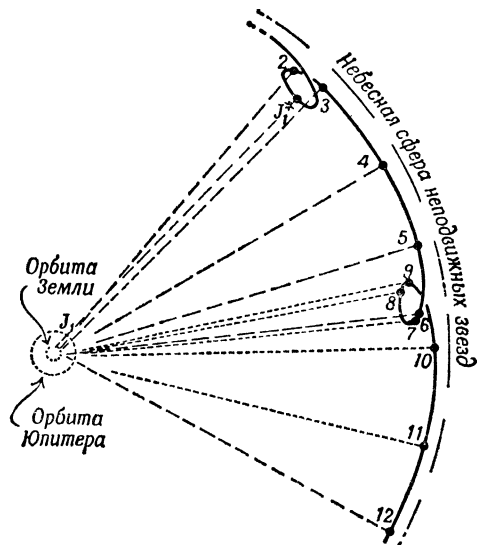
а — вся система в целом; б — внутренняя область в увеличенном масштабе. Орбиты почти круговые, Солнце несколько смещено от центра системы. Доказано расположение орбит, но размеры даны не в масштабе,



Фиг. 54. Объяснение Коперником движения планеты по эпициклу.

Прямые E_1J_1 , E_2J_2 и т. д. — линии наблюдения, идущие от Земли к Юпитеру (наблюдения производятся через каждые два месяца). а — показаны две стадии; б — показано несколько стадий; в — показано еще большее число стадий. Линия наблюдения совершает сложные колебания.

Неподвижные звезды должны находиться гораздо дальше, так как мы не наблюдаем параллакса. Отмечая положение Юпитера относительно неподвижных звезд, мы смотрим вдоль воображаемой линии, соединяющей Землю с Юпитером и идущей дальше к звездам. Тогда по мере того, как Земля совершает вращение по своей орбите, а Юпитер также вращается вокруг Солнца, только медлен-



Фиг. 55. Объяснение Коперника.

Видимые положения Юпитера на фоне звездного неба. Это фиг. 54, в, выполненная в другом масштабе (здесь линия наблюдения, идущая к J^*_1 , является продолжением E_1J_1). Линии наблюдения проведены параллельно соответствующим линиям на фиг. 54, в.

нее, эта линия колеблется то в одну, то в другую сторону, описывая эпициклоиду среди звезд. Когда Земля находится в точке E_1 , Юпитер находится в точке J_1 , и наблюдатель, смотрящий вдоль линии E_1J_1 , видит Юпитер на фоне звезд в положении J^*_1 . Когда Земля проходит точки $E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6$ и т. д., Юпитер медленно движется от J_1 к J_2, J_3, J_4, J_5, J_6 и т. д. Наблюдатель на Земле видит Юпитер в направлениях E_1J_1, E_2J_2 и т. д., и ему движение этой планеты по мере вращения Земли представляется то в прямом направлении, то в обратном. Этот процесс показан более подробно на фиг. 55.

Коперник объяснил движения Марса, Юпитера и Сатурна по эпициклоидам, предположив, что они вращаются вокруг Солнца по большим круговым орбитам, проходящим вне орбиты Земли. По его представлениям, Венера и Меркурий движутся по меньшим орбитам, находящимся ближе к Солнцу, нежели орбита Земли, и лежащим внутри нее. Этим можно было объяснить их поведение, т. е. то, что они находятся ближе к Солнцу и колеблются то в одну, то в другую сторону по обе стороны от него. Таким образом, одна и та же схема объясняла движение как «внутренних», так и «внешних» планет.

Коперник не только предложил более простую схему, но извлек из нее новую информацию о размерах орбит различных планет и о том, в каком порядке они расположены. В системе Птолемея круговые орбиты могли иметь любые размеры и не играло роли, какую планету считать самой внешней. В гелиоцентрической схеме орбиты располагались в определенном порядке и их размеры находились в определенных соотношениях. Из видимых движений планет Копернику было очевидно, орбиты каких планет наибольшие, а каких наименьшие.

Задача 1

Попробуйте с помощью фиг. 54 и 55 ответить на следующие вопросы. Предположим, что периоды времени, в течение которых Земля и Юпитер совершают полный оборот вокруг Солнца, остались теми же (наш год, «год» Юпитера), но изменился радиус земной орбиты. Как изменится форма петель видимой траектории Юпитера на фоне звездного неба,

- а) если радиус земной орбиты станет очень малым?*
- б) если радиус земной орбиты станет почти таким же большим, как радиус орбиты Юпитера?*

Порядок расположения планет должен был быть следующий:

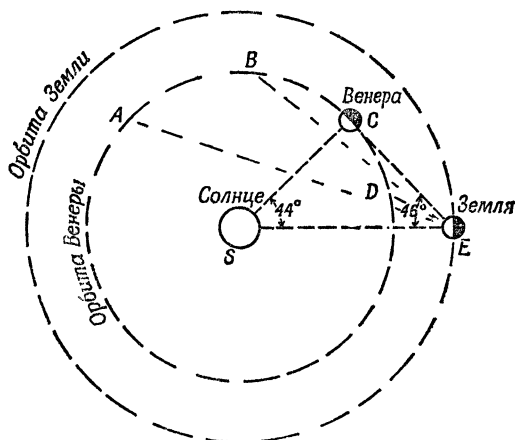
СОЛНЦЕ, в центре неподвижное;
Меркурий, ближайшая к Солнцу планета;
Венера;
Земля и вращающаяся вокруг нее Луна;
Марс;
Юпитер;
Сатурн, самая далекая из известных тогда планет.

Считая орбиты планет правильными окружностями, Коперник вычислил на основании уже имеющихся наблюдений их относительные радиусы и смог поэтому дать в надлежащем масштабе довольно точную карту планетной системы. Чтобы получить из

этих относительных значений действительные радиусы, ему нужно было измерить абсолютную величину любого из них, например расстояние от Солнца до Земли. Это расстояние было известно лишь очень приблизительно ¹⁾, поэтому масштаб созданной им полной схемы планет не был особенно надежен.

Определение радиусов орбит

Чтобы представить себе, как Коперник вычислял относительные радиусы, попробуйте решить эту задачу для внутренней планеты, скажем для Венеры. Венера находится ближе к Солнцу, чем Зем-



Фиг. 56. Определение относительных радиусов орбит.

Расстояние от Солнца до Венеры здесь больше, чем это соответствует масштабу.

ля, и движется вокруг него по орбите меньшего радиуса. Эта орбита видна с Земли под таким углом, что Венера представляется наблюдателю то впереди, то позади Солнца, но путь, совершаемый ею, недолог, и она как бы возвращается обратно. Поэтому Венеру можно наблюдать только вблизи Солнца как утреннюю или вечернюю «звезду». Когда наблюдателю кажется, что Венера находится дальше всего от Солнца, как раз в той точке, где она как бы поворачивает и начинает двигаться в обратном направлении, на са-

¹⁾ Коперник пользовался значением, в 20 раз меньшим действительного, взятым из вычислений древних греков.

мом деле она должна находиться в точке C , лежащей на касательной, проведенной от Земли к орбите Венеры (фиг. 56). Когда Венера находится в положениях $A, B, D, \dots$, будет казаться, что она ближе к Солнцу. Согласно геометрическим свойствам окружности, касательная перпендикулярна радиусу SC . Таким образом, в треугольнике ECS угол при вершине C прямой, а угол при вершине E можно измерить с Земли. Зная эти углы, можно изобразить в масштабе подобный треугольник и найти соотношение между SC и SE , т. е. между радиусами орбит Венеры и Земли соответственно. Чтобы измерить требуемый угол при вершине E , нужно определить угловое расстояние между Венерой и Солнцем в тот момент, когда наблюдателю кажется, что Венера наиболее удалена от Солнца. Если вы не сможете произвести непосредственных измерений из-за слепящей яркости солнечных лучей, подождите захода Солнца, определив предварительно, в каком месте он произойдет, и затем наблюдайте за Венерой день за днем, пока расстояние между нею и Солнцем не окажется наибольшим. Представить, как измеряется угол, можно с помощью соединенных между собой брусков с просверленными в них отверстиями для наблюдений, хотя в действительности метод измерения будет несколько более сложным. Наблюдения показывают, что угол SEC приблизительно равен 46° . Если начертить и измерить треугольник с углами $46, 90$ и 44° , то получится, что отношение сторон SC к SE равно примерно $72/100$. Отсюда следует, что радиусы орбит Венеры и Земли относятся как $72 : 100$. Рисовать треугольник нет необходимости, если имеются тригонометрические таблицы, которыми в свое время располагал и Коперник. Отношение SC/SE равно $\sin 46^\circ$, который, как видно из таблиц, равен $0,72$. Коперник определил этот угол путем измерений и выполнил те же вычисления для Венеры и Меркурия. Для внешних планет геометрические построения гораздо сложнее, но Коперник примерно тем же способом вычислил относительные размеры их орбит. Так он смог нанести орбиты в масштабе на карту и правильно разместить планеты на орбитах в некоторый начальный момент. Чтобы предсказать их положения в другие моменты времени, ему надо было знать длительность «года» каждой из планет, т. е. время, в течение которого планета совершает полный оборот по орбите. Эти периоды обращения Коперник определил из записанных ранее наблюдений. Он установил, сколько времени требуется планете, чтобы совершить оборот и вернуться на прежнее место.

Пользуясь полученными до него данными, Коперник нанес положения планет на карту (в соответствующем масштабе) и опреде-

лил их положения в прошлом, настоящем и будущем. Он мог проверить их прежние положения и сделать отсюда вывод, насколько правильна его «картина», или «теория», как мы будем ее теперь называть. Эта проверка дала положительные результаты, хотя и имелись расхождения, которые после тщательных вычислений привели к видоизменению простой картины.

Коперник приводил и другие доказательства правильности своей теории:

1) Марс много ярче (кажется большим по размеру) в некоторые времена года, очевидно, потому, что находится в это время ближе к Земле. Согласно системе Птолемея, Марс движется вокруг Земли по слегка эксцентрической орбите; однако на основании этого нельзя удовлетворительно объяснить довольно значительные изменения его расстояния от Земли. Согласно же схеме Коперника, это расстояние меняется в пределах от суммы радиусов орбит до их разности. Действительно, Марс ярче всего, когда его расстояние от Земли наименьшее, в те времена года, когда Марс и Земля находятся по одну и ту же сторону от Солнца, — Марс «противостоит» Солнцу в полночь, когда находится у нас над головой.

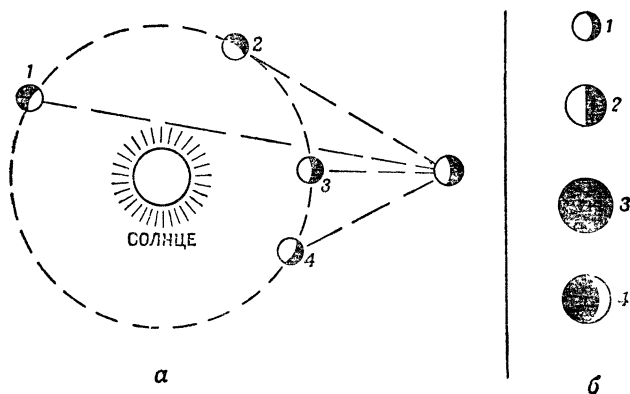
2) Как раз в тот момент, когда внешняя планета проходит *обратную* часть петли, она находится точно против Солнца (противостояние). Птолемей не мог объяснить этого факта, который с очевидностью следует из геометрических построений Коперника (см. фиг. 55).

3) Если Венера и Меркурий ближе к Солнцу, чем Земля, и обращаются вокруг него по малым орбитам, то, смотря на них, мы должны видеть не всю планету, а лишь ту ее сторону, которая обращена к Солнцу и ярко освещена (фиг. 57). Так что эти две планеты должны иметь две стадии, или «фазы», подобно Луне, когда она переходит постепенно от новолуния к полумесяцу, затем к полнолунию и т. д.¹⁾ В случае большой планеты, Венеры, эти стадии, по мнению противников системы Коперника, должны были бы тоже наблюдаться, а поскольку они не наблюдались, то следовало считать всю гелиоцентрическую систему неверной. Существует рассказ, скорее всего недостоверный, о том, что Коперник ответил на это возражение следующим образом: «Если бы когда-либо удалось в достаточной степени усовершенствовать наше зрение, мы смогли бы наблюдать фазы Меркурия и Венеры». Через сто лет

¹⁾ По схеме Птолемея Венера также проходит через фазы, но не через все этапы от серповидной до «полумесяца» и затем до «полнолуния»,

фазы Венеры действительно удалось наблюдать с помощью телескопа Галилея.

Венцом работ Коперника была данная им новая простая интерпретация прецессии равноденствия. Прецессия, открытая еще греками, описывалась как медленное вращение всей звездной системы (и Солнца) вокруг оси эклиптики, тогда как Земля, ее экваториальная плоскость и ось, проходящая с севера на юг, остаются в покое. Коперник «перевернул» это представление, предположив, что покоится Солнце и плоскость его эклиптики, т. е. плоскость

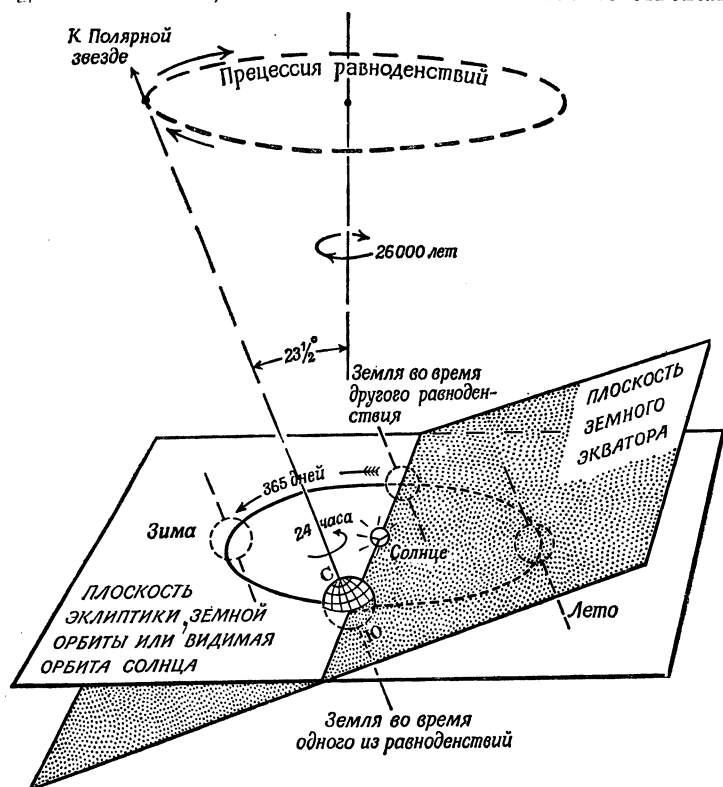


Фиг. 57. Фазы Венеры с точки зрения наблюдателя на Земле.

земной орбиты остается неподвижной. Экваториальная плоскость Земли (и небесный экватор) медленно вращается, все время образуя с эклиптикой угол $23\frac{1}{2}^{\circ}$. После этого Коперник смог дать простое описание прецессии: ось вращения Земли описывает конус с углом раствора $23\frac{1}{2}^{\circ}$, совершая полный оборот за 26 000 лет. Хотя Коперник дал ясную картину того, что происходит при прецессии равноденствий, он не знал «причины» этого явления. Задача была решена Ньютоном, который показал, что это явление, подобно многим другим астрономическим явлениям, — результат всемирного тяготения.

Хотя Коперник стремился к максимальной простоте, он пришел к выводу, что движение с постоянной скоростью по простым круговым орбитам не соответствует наблюдаемым фактам. Ему пришлось предположить, что орбиты эксцентричны, и даже ввести маленькие эпициклы. При этом простота несколько пострадала.

Стало, пожалуй, труднее догадаться о тех простых правилах, которые лежат в основе движения планет и которые позднее были открыты Кеплером. Но, подобно Птолемею, Коперник настойчиво добивался того, чтобы его схема точно соответствовала его

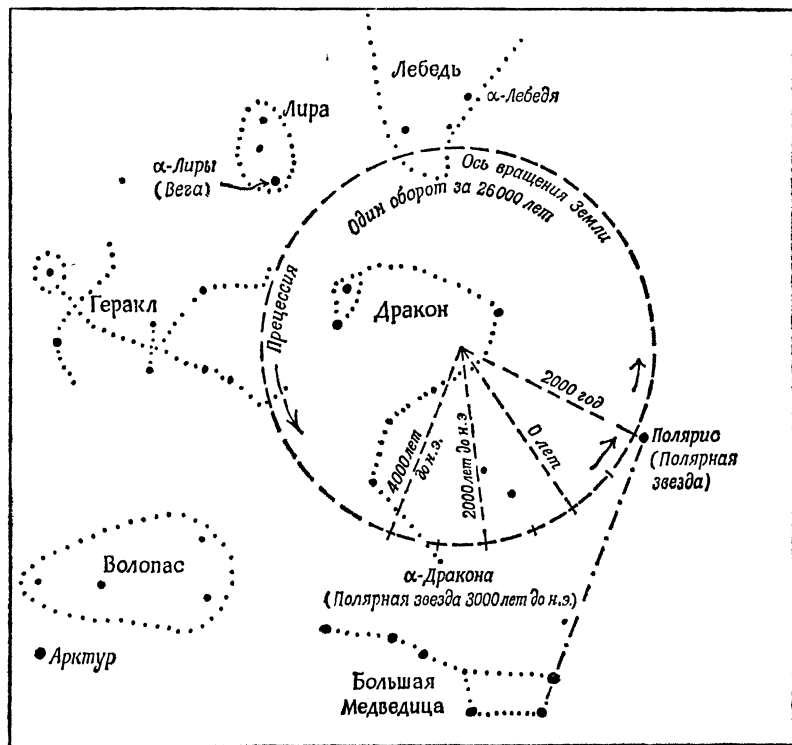


Фиг. 58. Схема, иллюстрирующая прецессию равноденствий.

наблюдениям. В этом отношении обе системы являлись хорошим описанием наблюдаемых движений небесных тел, и мы не должны называть «неверной» ни ту, ни другую.

Коперник потратил 20 лет на составление и совершенствование своей схемы. За это время он стал известен среди математиков и астрономов, некоторые приезжали к нему, вели с ним беседы, проводили совместные исследования и распространяли его идеи. Он посылал в письмах друзьям краткое описание своей схе-

мы. Но он не жаждал славы. Многие убеждали его опубликовать свои работы: звездные карты, таблицы, большую схему Солнечной системы с полным обоснованием и со всеми разработанными им деталями. Даже после того, как один из его друзей опубликовал



Фиг. 59. Прецессия равноденствий.

Изображение большого участка северного звездного полушария ($\sim 90^\circ \times 90^\circ$), иллюстрирующее медленное движение небесного Северного Полюса на фоне звезд. Точка, в которой ось вращения Земли пересекает звездное небо, медленно движется по почти круговой траектории, совершая один оборот примерно за 26 000 лет (по Р. Боллу).

предварительное сообщение о его системе, Коперник еще много лет не открывал ее миру, желая все исправить и улучшить, прежде чем предложить консервативно настроенным читателям столь радикальное изменение существовавшей до того точки зрения. Коперник опасался конфликта с церковью, служителем которой являлся сам; да и его друг, который предложил взять на себя расхо-

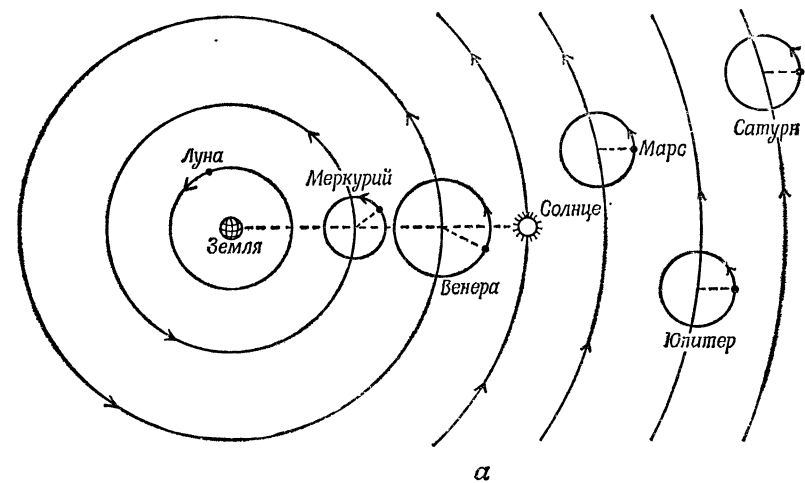
ды по опубликованию книги, был кардиналом. Но Коперник знал, что выход книги вызовет бурю, он боялся оказаться в смешном положении. Чтобы убедить враждебно настроенных читателей, требовались хорошо продуманный критический анализ существовавшей дотоле точки зрения на строение Вселенной и приведенные в стройную систему данные.

Попытка опровергнуть систему Птолемея, созданную и многократно подтвержденную великими людьми прошлых веков и ставшую почти священной благодаря традиции и той практической пользе, которую она до сих пор приносила, была нелегкой задачей. Система Птолемея была неточной, даже в календаре, составленном на ее основе, было огромное количество ошибок. И все же никто не сомневался в ее правильности. Астрономы лишь пытались внести поправки в радиусы орбит и изменить «экванты», чтобы получить лучшее согласие с наблюдениями. Коперник хотел, чтобы его теория стояла на незыблемой почве. Он мог позволить себе не торопиться, так как твердо верил в то, что истина должна восторжествовать.

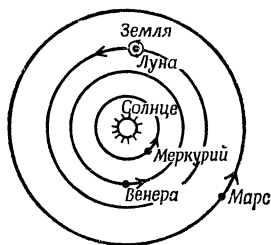
В конце концов, уступая уговорам друзей, он написал большую книгу, которая была отдана в печать и опубликована незадолго до его смерти. Эта книга носила название «De Revolutionibus Orbium Coelestium» (Об обращениях небесных сфер). Он посвятил ее папе римскому. Вот цитата из его предисловия к книге ¹⁾:

«Думается мне, святейший отец, что некоторые лица, как только узнают, что я в сочинении моем о движениях небесных сфер допускаю различное движение земного шара, без дальнейшего разбора осудят меня и мои воззрения. Я вовсе не столь высокого мнения о своей теории, чтобы не обращать внимания на мнения других. Хотя знаю, что мысли философа довольно далеки от суждения народного, так как первый обязан во всем доискиваться истины настолько, сколько дано от бога уму человеческому, но тем не менее я полагаю, что должно отрешиться от взгляда, далекого от истины. По этой причине, рассуждая сам с собою о том, сколь нелепо покажется всем, знакомым с утвердившимся в продолжение стольких веков мнением о неподвижном положении Земли в центре Вселенной, если я, наоборот, стану утверждать, что Земля движется. Я долго колебался, обнародовать ли в печати мои исследования...».

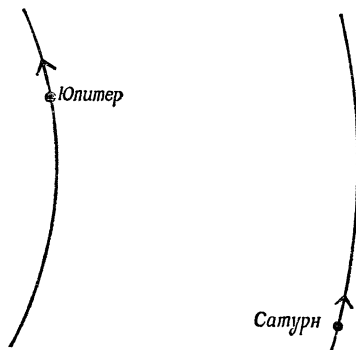
¹⁾ «Николай Коперник», Сборник статей к четырехсотлетию со дня смерти, Издательство Академии наук СССР, 1947.



a



б



Фиг. 60. Сравнение системы Птолемея и системы Коперника.

a — система Птолемея, изображенная без учета эксцентриситета, или «эквантов». Порядок и соотношения размеров орбит не определены. Радиусы эпициклов даны не «в масштабе»; *б* — система Коперника, изображенная без учета эксцентриситета, или малых эпициклов. Соотношения орбит даны грубо в масштабе. Орбита Луны изображена не в масштабе.

Далее он пишет: «Если бы нашлись пустые болтуны, которые, хотя вовсе не сведущие в математических науках, позволили бы себе осуждать или опровергать мое предприятие, намеренно искажая какое-либо место Священного Писания, то я не стану на них обращать внимания, а, напротив, буду пренебрегать подобным неразумным суждением...».

В своей книге Коперник привел таблицы звезд и описал наблюдения над движением планет. В ней дано также пространное изложение новых представлений о строении Солнечной системы.

Книга была сдана в печать и издана в Нюрнберге. Она начинается с общего описания новой системы и ее преимуществ¹⁾. Затем идут главы, излагающие необходимые сведения из тригонометрии, и раздел, посвященный сферической астрономии. После этого подробно обсуждается «движение» Солнца (или, вернее, Земли) с объяснением прецессии равноденствий. Затем рассматривается движение Луны, а в последних двух разделах очень подробно описаны движения планет. В самом конце приводятся измерения расстояний до Солнца и Луны и радиусы орбит для всех планет.

Это была поистине великая книга, имевшая огромное значение. Коперник так и не читал ее в отпечатанном виде. Ожидая ее выхода в свет, он, уже семидесятилетний старик, тяжело заболел и был частично парализован. Первая отпечатанная копия была прислана ему 23 мая 1543 г.; он видел ее, прикоснулся к ней и в ту же ночь тихо скончался.

Задача 2

Составьте список ученых, которые упоминались в главах, посвященных античной астрономии:

- а) ученых, которые придерживались точки зрения Коперника (приведите, если сможете, даты);*
- б) ученых, которые придерживались геоцентрической точки зрения на строение Вселенной (приведите, если сможете, даты).*

Задача 3. Временные графики

- а) На большом листе миллиметровки или обычной бумаги начертите «временной график», показывающий рост астрономических знаний от первобытного человека, вавилонян и т. д. вплоть до греческой школы в Александрии.*

¹⁾ Друг Коперника написал к книге робкое предисловие, в котором говорилось, что это всего лишь теория. На самом же деле Коперник считал, что его схема вполне соответствует действительности.

- б) Нарисуйте другую схему, охватывающую период от древних греков до Коперника, и укажите на ней наиболее выдающихся астрономов.

Задача 4. Размеры орбит

- а) Поясните с помощью диаграммы, как Коперник определял радиус орбиты какой-либо планеты. Дайте геометрическое доказательство.
б) Радиусы каких планет можно определять с помощью описанного в предыдущем вопросе метода?
в) Какие другие астрономические измерения напоминают метод, описанный в первом вопросе?

Задача 5. Траектории планет

Наблюдения показали, что планеты, например Юпитер, движутся относительно звезд по петлеобразной траектории, «эпициклоиде».

- а) Как получал такую траекторию Птолемей?
б) Как объяснял Коперник такую траекторию планеты?

Задача 6

- а) Из чего следует, что Венера должна иметь фазы, аналогичные фазам Луны?
б) Из чего следует, что Юпитер не имеет фаз? (Приведите схему).

«...своей судьбою люди правят,
Не звезды, милый Брут ...».

Шекспир, «Юлий Цезарь», Акт I.

Революция, совершенная теорией Коперника

Коперник стремился вырваться из окружающей его атмосферы аристотелева догматизма. В поисках любезной ему истины он сумел создать более совершенную картину Вселенной, чем та, которая существовала до него. Хотя Коперник настойчиво преследовал поставленную перед собой цель, он был миролюбив, деликатен, внимателен к другим и убедил многих в правильности своей точки зрения. После его смерти созданная им теория строения нашей планетной системы стала приобретать все большую и большую известность. Составленные им таблицы проверялись, исправлялись и издавались. Определенная Коперником продолжительность года (365 дней 5 часов 55 минут 58 секунд) была использована позднее одним из римских пап для реформы календаря, в котором до этого имелаь несогласованность с временами года. Когда около восьмидесяти лет до этого советовались с самим Коперником по поводу реформы календаря, он не решился на нее, ибо хотел сперва завершить и четко сформулировать свою теорию строения Вселенной. Новый календарь явился дополнительным и очень важным его вкладом в астрономию. Мы пользуемся до сих пор этим календарем. Схема высокосных лет так хорошо разработана, что будет соответствовать солнечному календарю времен года с точностью до одного дня еще 3000 лет!

Однако по мере того, как последователи Коперника стали пропагандировать новую систему не так скромно и тактично, как в свое время он сам, ее значение становилось все более явным. Она стала волновать философов, ею заинтересовались не только ученые, которых она побуждала к созданию и развитию новых идей, но и простые люди; породила она и открытую оппозицию церкви. В течение столетия, прошедшего со дня смерти Коперника, его работа, которую он посвятил папе, стала предметом самых ожесто-

ченных споров, какие когда-либо знало человечество. Как это могло произойти? Дело в том, что работа Коперника не только опровергла все то, что ранее казалось очевидным и принималось как нечто само собой разумеющееся, она противоречила существовавшему в течение веков мировоззрению. Коперник объявил войну (хотя сам и не отдавал себе, вероятно, в этом отчета) огромному взаимному переплетению образа мыслей и верований.

В те дни не существовало еще деления науки на отдельные области, такие, как физика, биология, физиология, психология, социология, языкознание, искусство, философия. Получая ныне образование в специализированных учебных заведениях, мы едва ли можем представить себе запутанную и тесно переплетенную картину мировоззрения времен средневековья. Ученые того времени, встречаясь друг с другом, устраивали дискуссии, несли просвещение в народ и были специалистами во всех областях, они стремились сохранить такую схему, которая была бы прочной основой всех знаний и связывала бы все науки в единую систему.

В то время считалось, что природа состоит из четырех основных элементов: земли, воздуха, огня и воды. Жидкости обладают текучестью, потому что состоят главным образом из воды; твердые тела обладают большой плотностью и прочностью, потому что состоят главным образом из земли, и т. д. Поведением людей управляют четыре «склонности»; в соответствии с тем, какая из них преобладает в человеке, он может быть сердитым, грустным, спокойным, твердым. Планетам, этим «блуждающим» по небу звездам, приписывались различные свойства, которые связывали их как с человеком, так и с четырьмя физическими элементами. Их связывали с темпераментом человека и его судьбой, а также с металлами, свойства которых считались зависящими от пропорций, в каких они содержат землю и огонь. (Например, Марс олицетворял бога войны, сердитый нрав, горячий металл.) Планеты и звезды связывали человека с божественным провидением. Система небесных сфер являлась для человека идеальной моделью Вселенной. За внешней звездной сферой находились небеса, занимавшие самое почетное место в схеме Вселенной. Посягнуть на устроенную таким образом планетную систему означало изменить все учение о природе и человеке и даже отношение человека к богу.

Но разве Коперник посягнул на планетную систему с ее движущимися сферами? Он лишь передвинул центр этой системы от Земли к Солнцу. Чтобы понять, почему это разрушало все мировоззрение в целом, посмотрим сперва, почему существование сфер принималось как нечто не требующее доказательств.

Профессор Дингл так описывает точку зрения одного историка:

«Их (сферы) не видели и не наблюдали непосредственно; почему же в таком случае все же верили, что они существуют? Если вы вообразите, что Земля покоится, и понаблюдаете за небом в течение нескольких часов, то будет нетрудно ответить на этот вопрос. Вы увидите множество звезд, вращающихся вокруг одной оси с одинаковой скоростью и совершающих полный оборот в течение суток. Вы не сможете при этом поверить, что каждая звезда движется независимо от других и что их движения лишь случайно оказываются в таком соотношении. Только безумец мог бы сомневаться, что наблюдает вращение единой сферы с прикрепленными на ней звездами. И если звезды расположены на сфере, то Солнце, Луна и планеты, движения которых почти одинаковы, должны также подчиняться аналогичным законам. Таким образом, в течение многих столетий существование сфер считалось бесспорным. Люди уже не задумывались над тем, какими причинами обусловлено подобное устройство Вселенной, а принимали его как нечто само собой разумеющееся, подтвержденное многочисленными экспериментальными фактами; да и сам Коперник, несмотря на долгие годы размышлений над основными проблемами астрономии, никогда не сомневался в их существовании»¹⁾.

Но вскоре стало ясно, насколько огромно значение работ Коперника. Если Земля вращается, то уже нет необходимости считать, что вращается и небесная сфера, на которой закреплены звезды. Более того, звездам вовсе не надо находиться на такой сфере — они могли просто висеть в небе на любом расстоянии от Земли, и если это так, то, возможно, и на *самых различных* расстояниях. Они могли находиться и в удаленной области неба. Это было потрясающим переворотом взглядов. Где же тогда должно было находиться то Небо, с которым были связаны все религиозные воззрения, где должно было находиться жилище бога и обиталище душ умерших? Через сто лет после Коперника Джордано Бруно, высказавший предположение о том, что пространство бесконечно и содержит бесчисленное множество звезд, представляющих собой солнца, находящиеся на огромных расстояниях от нашей планетной системы, за свои кощунственные взгляды был сожжен на костре как еретик.

¹⁾ Из лекции, прочитанной профессором истории и философии науки Гербертом Динглом в Лондонском университете. Другие приведенные здесь цитаты также взяты из этой лекции, впоследствии вошедшей в виде третьей главы в сборник «History of Science», London.

Кроме того, Коперник лишил Землю ее привилегированного положения центра Вселенной и уравнил ее в правах с Марсом и Юпитером как планету, вращающуюся подобно им вокруг Солнца. Вся система сфер стала казаться менее сложной и менее необходимой; это совершенно изменило существовавшие ранее взгляды на то, что планеты влияют на находящуюся в центре планетной системы Землю и на судьбы населяющих ее людей.

«Нам трудно сейчас представить себе тот эффект, который произвела теория Коперника на мыслящих людей XVI столетия... Вместе со сферами исчезли небеса, как обитель блаженных душ, потеряло смысл различие между небесным и земным, место, занимаемое человеком во Вселенной, стало неопределенным.

...Сам Коперник... придерживался целиком тех же взглядов, что и другие ученые средневековья, и если бы он мог предвидеть, к чему приведет созданная им теория, то, вероятно, пришел бы в ужас от ответственности за содеянное им. Но именно благодаря его трудам смогла возникнуть новая научная философия»¹⁾.

Если теория Коперника вызвала переворот в умах ученых, то как могла воспринять ее огромная масса простых людей, когда они начали понимать ее значение? Несомнительной оказалась не только система сфер, в которую неизбежно верили до тех пор, но под угрозой коренных изменений находилась вся система накопленных до того знаний и верований.

Труды Коперника дошли до простого народа главным образом благодаря тому влиянию, которое они оказали на астрологию. В течение многих столетий суеверный народ — почти все, от короля до нищего, — верил, что Солнце, Луна и планеты влияют на их судьбы. Судьбу человека предсказывали по его гороскопу, который составлялся на основе положения планет в момент его рождения. Считалось, что гороскоп, составленный опытным и уважаемым астрологом, может помочь королям мудро (или надежно) управлять государством и может предсказать будущее любого человека. Пока Земля рассматривалась как центр небесной системы, вокруг которого странным образом блуждают планеты, было естественно считать, что движения планет совершаются ради нас и даже могут управлять нашей судьбой. Когда же Коперник передвинул Солнце в центр планетной системы, предположив, что *Земля только одна из планет*, он предопределил этим падение астрологии — из советника королей и утешителя простых людей она превратилась в то,

¹⁾ Из лекции профессора Герберта Дингла.

чем является и теперь, — в забавную сказку. И все же цивилизованный человек настолько доверчив, беззащитен, а быть может, романтичен, что публикуемые и в настоящее время книги по астрологии еще находят своего читателя.

Церковь начала борьбу против системы Коперника скорее всего по двум причинам: во-первых, эта система противоречила учению церкви в области астрономии и философии и, во-вторых, утверждение новой системы ставило под вопрос, вернее, даже отрицало авторитет и традиции системы Птолемея. Бунтари, борцы за новые идеи, которым доставляет удовольствие опровергать то, что уже существует, редко находят поддержку. В те дни церковь ревностно оберегала свою власть и настаивала на беспрекословном подчинении. Всякий, кто подвергал сомнению авторитет церкви или не соглашался с ее учением, рисковал жизнью и, по мнению церкви, своей душой. Таких людей в те времена было немного. Это были мученики науки. Проповедующий новую теорию ученый мог быть безопасным для церкви; однако тот, кто настаивал на истинности этой теории, оказывался уже бунтовщиком. А кто ниспровергает что-то, может восстать и по другому поводу, кто настойчиво спорит, отстаивая свою точку зрения, способен восстать и против церкви или государства (против любого авторитета). Это уже было опасно. Не прошло и ста лет, как книга Коперника «Об обращении небесных сфер» была внесена в список запрещенных церковью книг (в этом списке она оставалась 200 лет, разрешена она была, т. е. вычеркнута из списка, лишь в 1830 г.).

В то бурное для астрономии время появился Тихо Браге, великий наблюдатель звездного неба, чьи поразительно точные измерения послужили основой для открытий Кеплера и последующих объяснений Ньютона. Галилей был современником Кеплера и подвергался тяжелым гонениям. По прошествии нескольких веков взгляды Коперника стали казаться безопасными. Как отмечает Лодж¹⁾, подобная трансформация происходит систематически, из

¹⁾ Я должен выразить свою признательность и восхищение Оливеру Лоджу, который первым продемонстрировал в своей книге «Пионеры науки» (Pioneers of Science, London, 1893), как история астрономии помогает понять историю физики. В последующих главах я заимствую из его книги некоторые общие идеи, а во многих местах отдельные выражения и целые абзацы. Я признателен ему и его предшественникам, к которым он в свою очередь обращался. Современные историки науки совершенно правильно удалили из его книги некоторые ошибочные данные, стремясь получить более объективное и всеобъемлющее описание исторических фактов, где было бы поменьше преклонения перед отдельными личностями; но эта книга — труд физика и человека с большим кругозором.

столетия в столетие. В начале XIX века геологов яростно осуждали как нечестивых критиков истории сотворения мира по Библии. По прошествии нескольких десятилетий геологию оставили в покое и осуждению и запрету подверглась теория эволюции — это гонение, пожалуй, продолжается в известной степени и поныне. Каждая эпоха имеет группу, а иногда и несколько групп ученых-мятежников, которых преследуют и осуждают, а затем по прошествии некоторого времени начинают считать безвредными. Некоторые из таких людей просто чудачки, другие же — мудрые пророки, определяющие характер развития человечества и знаний, люди, которые намного опережают свое время.

Тихо Браге

Тихо Браге был старшим сыном в благородной датской семье, «настолько благородной и невежественной, насколько могли ее такую сделать шестнадцать полей ее герба». Единственными достойными занятиями для настоящих аристократов считались охота и война; хотя чтение книг в то время стало уже входить в моду, считалось, однако, что этим должны заниматься только монахи, что наука бесполезна и, пожалуй, сродни колдовству. Тихо, вероятно, воспитали бы в соответствующем духе и он стал бы военным, если бы его не усыновил дядя, человек, значительно более образованный, нежели родители Тихо. Родители неохотно согласились отдать сына и отдали только тогда, когда родился второй сын. Дядя дал Тихо хорошее образование. С семи лет Тихо начал изучать латинский язык; его родители возражали, но дядя убедил их, что это поможет Тихо при изучении права. В возрасте 13 лет Тихо поступил в университет, чтобы изучать философию и право; там внезапно он заинтересовался астрономией. Произошло это случайно. Астрономы предсказывали затмение Солнца. Когда оно действительно произошло в указанное время, Тихо был поражен и восхищен наукой, которая способна совершать такие чудеса — делать столь точные предсказания. Он продолжал изучать право, но сердце его было уже отдано астрономии. На свои карманные деньги он купил астрономические таблицы и латинский перевод «Альмагеста» Птолемея, чтобы серьезно заняться изучением астрономии. Спустя три года дядя послал его в сопровождении наставника за границу, чтобы он мог, путешествуя, ознакомиться с обучением праву в германских университетах. Но и там Тихо продолжал втайне заниматься астрономией. Большую часть ночи он проводил, наблюдая звезды и используя небесный глобус

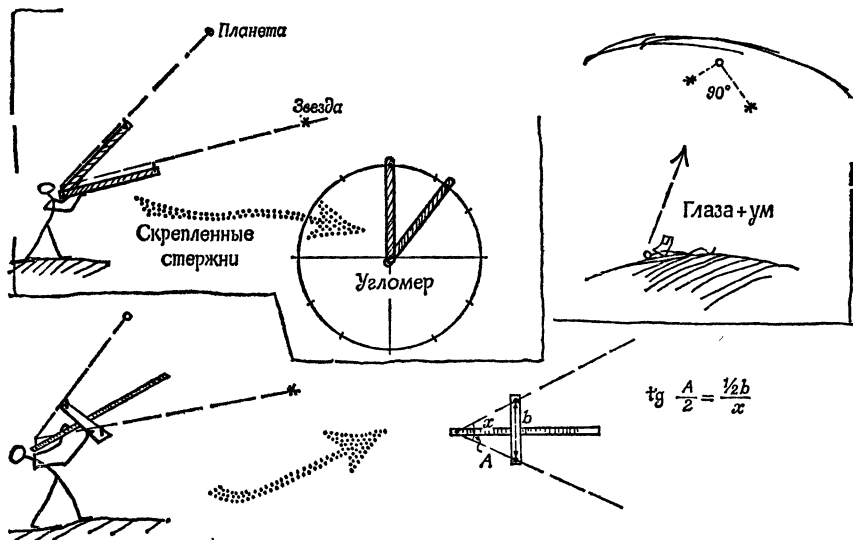
размером не больше кулака. На все деньги, которые ему удалось получать от своего наставника, он покупал приборы и книги, не говоря, на что они ему нужны. Вскоре он обнаружил, что таблицы положений планет неточны. Таблицы Птолемея отличались от таблиц Коперника: и те и другие не соответствовали действительности. Ему было всего 16 лет, но он понял то, чего до него не удалось понять профессиональным астрономам Европы, — для утверждения той или иной астрономической теории прежде всего необходим длинный ряд точных наблюдений. На основе немногочисленных и носящих случайный характер наблюдений над движениями планет нельзя было решить, какая из систем небесных тел правильна. Всю дальнейшую жизнь Тихо Браге посвятил выполнению этой задачи.

Когда ему было 17 лет, он наблюдал интересное событие — соприкосновение Юпитера и Сатурна. Две планеты находятся в соприкосновении, когда одновременно пересекают одну и ту же небесную долготу, находясь как бы близко друг к другу. Такое странное «сближение» планет можно было предсказать с помощью таблиц Птолемея или Коперника. Суеверные люди видели в подобных событиях знамение и верили, что оно приносит удачу или беду. Молодой энтузиаст Тихо Браге наблюдал соприкосновение Юпитера и Сатурна и сравнил отмеченное им время этого события с предсказаниями таблиц. Оказалось, что расхождение с таблицами Птолемея (после их пересмотра Альфонсом) равнялось одному месяцу ¹⁾, а с таблицами Коперника — несколькими дням. Тогда Тихо решил посвятить свою жизнь составлению более совершенных таблиц и выполнил эту задачу более чем успешно. Он стал одним из самых искусных наблюдателей. Но несмотря на аристократическое происхождение и образование, он был суеверен и свято верил в оккультные силы и влияние движения светил на судьбу человека. Он верил, что именно предсказанное сближение планет вызвало страшную чуму, пронесшуюся спустя некоторое время по Европе.

Тихо начал проводить свои наблюдения с простым прибором: парой планок, соединенных наподобие циркуля, одна ножка которого указывала на планету, а другая на неподвижную звезду. Он измерял угловое расстояние с помощью нарисованного на бумаге круга с делениями (фиг. 61), положение планеты он часто

¹⁾ Может показаться, что для предсказания даты встречи планет ошибка в месяц очень велика; однако эти таблицы были составлены Птолемеем четырнадцать столетий назад. Один месяц за 1400 лет — ошибка весьма малая, и это делает честь системе Птолемея, которая хотя и неуклюже, но довольно точно предсказывала такие события.

определял на глаз, когда она образовывала прямоугольный треугольник с двумя известными ему звездами. Вскоре он стал использовать рейку с ползуном, на концах которого имелись мушки. Наблюдатель, глядя через прицел на конце рейки, наводил мушки на звезды и таким образом измерял угол между ними. Браге обнаружил, что прибор проградуирован неточно, и тщательно составил

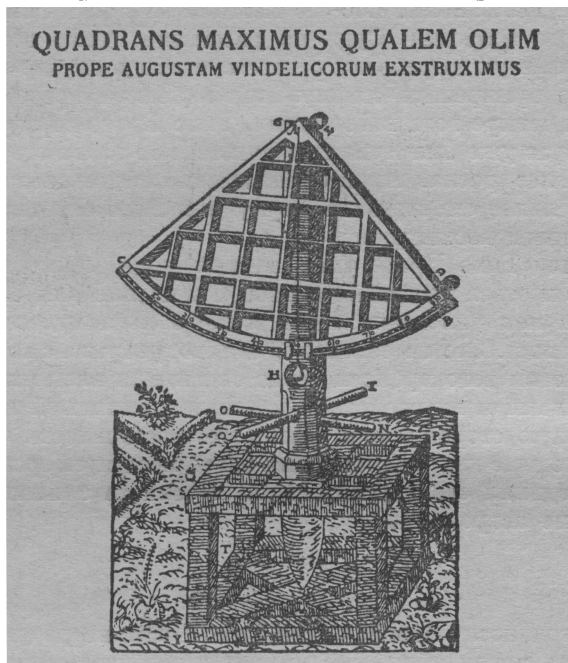


Фиг. 61. Первые приборы Тихо Браге.

таблицу поправок, дающую ошибки для каждого участка шкалы — точный метод, которым он пользовался потом всю жизнь. Так поступают хорошие экспериментаторы: чтобы увеличить точность своих измерений, они не пытаются сконструировать «идеальный прибор», они пользуются надежным и чувствительным прибором, который градуируют соответствующим образом. Затем составляют таблицу поправок, которой и пользуются при измерениях.

Угроза войны заставила Тихо Браге возвратиться домой. Его дядя умер, а остальная семья встретила его холодно. Его порицали за то, что он оставил изучение права, и с презрением отнеслись к его увлечению астрономией. Разочарованный, Тихо покинул Данию и уехал в Германию, чтобы там продолжать свои исследования. Во время путешествия он приобрел друзей среди богатых астрономов-любителей в Аугсбурге. Он убедил их в необходимости

проведения очень точных измерений, и они совместно сконструировали огромный квадрант для измерения положений звезд и планет (фиг. 62). Этот деревянный прибор имел столь большие размеры, что потребовалось двадцать человек, чтобы перенести его на предназначенное место в сад и установить его там. Круг этого квадранта имел радиус около 5 м 70 см. Смотри на Солнце или



Фиг. 62. Первый квадрант Тихо Браге (построен совместно с друзьями).

Эта иллюстрация, как и последующие, взята из составленного самим Тихо Браге описания его приборов и его научных трудов.

планету через отверстия *DE*, наблюдатель мог отсчитывать их «высоту» с помощью указателя *АН* по шкале. Огромные размеры прибора позволяли производить довольно точные измерения. Квадрант был проградуирован до шестидесятых долей градуса. У Тихо и его друзей был также секстант радиусом около 2 м. С этими приборами Тихо приступил к точным измерениям положений планет.

Во время пребывания в Германии с Тихо произошло неприятное происшествие. Отличаясь вспыльчивым характером, он затеял ссору, поводом к которой послужили какие-то расхождения из-за математики; последовал вызов на дуэль, дрались на шпагах, причем встреча была в один из декабрьских вечеров. Дуэль проходила почти в темноте, и Тихо лишился части носа. Ему пришлось сделать себе фальшивый нос (из металла или мастики, скорее из выкрашенного металла). Судя по рассказам, Тихо всегда носил с собой маленькую коробочку с клеем, чтобы в случае надобности можно было прикрепить сдвинувшийся с места протез.

Проведя четыре года в Германии, Тихо Браге вернулся домой, где на этот раз уже был принят радушно, ибо слава его как астронома все более росла. Аристократические родственники начали доброжелательнее смотреть на науку и к Тихо относились уже с некоторой долей восхищения.

Когда отец Тихо Браге умер, второй дядя пригласил Тихо в свое имение и отвел ему специальное помещение для занятий алхимией, так как увлечение Тихо всякого рода чудесами влекло его и к алхимии. Это не означало, однако, разрыва с астрономией, ведь астрология того времени тесно связывала планеты с различными металлами и их свойствами. Занятия алхимией имели свою положительную сторону: они дали Тихо возможность изучить металлы, пригодные для изготовления различных приборов. Поэтому он часто соединял свои исследования в области алхимии с исследованиями по астрономии.

Новая звезда

Спустя год после возвращения Тихо Браге на родину на небе ярко засияла новая звезда, ее видели в течение многих месяцев. Звезда была столь же яркой, как Венера, и ее можно было видеть даже при дневном свете¹⁾. Изумленный и восхищенный, Тихо тща-

¹⁾ Мы теперь знаем, что вспышка новой звезды, или просто *новой*, наблюдается довольно часто; внезапное сжатие или нечто иное приводит к нагреву звезды до высокой температуры. Гораздо реже (в среднем один раз в несколько столетий в нашей Галактике) наблюдается намного более яркая вспышка, так называемая *сверхновая* звезда. Такую звезду, вероятно, наблюдал Гиппарх, и новая Тихо тоже была сверхновой звездой. Согласно современным представлениям, при возникновении сверхновых звезд образуется радиоактивный элемент калифорний. Выполненные Тихо тщательные измерения угасания яркости звезды (по сравнению с другими звездами) хорошо соответствуют периоду полураспада калифорния — фантастическое современное применение его замечательных наблюдений.

тельно наблюдал за этой звездой с помощью большого секстанта и обнаружил, что она находится очень далеко, что это одна из неподвижных звезд «в восьмой сфере, которая прежде считалась неизменной». После многочисленных наблюдений и записей Тихо опубликовал сообщение об этой звезде.

Слава Тихо Браге росла, и группа молодых аристократов обратилась к нему с просьбой прочитать курс лекций по астрономии. Сначала он отказался, считая, что это унизит его достоинство как человека благородного происхождения, но затем по просьбе короля согласился.

К тому времени Тихо, к ужасу его семьи, женился на простой крестьянской девушке, но это помогло ему, видимо, освободиться от некоторых аристократических предрассудков.

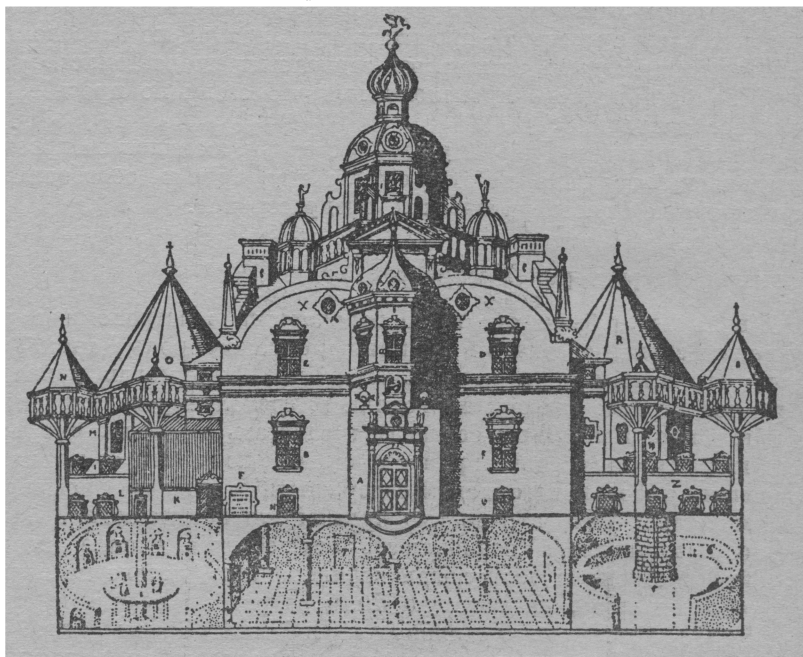
Большая обсерватория Ураниборг

Жизнь Тихо была так тесно переплетена с астрономией, что он решил снова переехать в Германию; однако король Дании Фредерик II, понимавший, что исследования Тихо могли принести честь той стране, где они проводились, сделал ему великолепное предложение. Если Тихо согласится работать в Дании, ему предоставят для его обсерватории остров, обеспечат его земельными владениями, большим окладом содержания и выдадут деньги для строительства. Тихо с радостью принял это предложение. Наконец-то представилась возможность осуществить давние мечты.

Тихо построил и оборудовал великолепную, дотоле не виданную обсерваторию, на которую были затрачены огромные средства¹⁾. Он назвал ее Ураниборг — Небесный Замок (фиг. 63). Обсерватория была построена на холме на острове Вен и окружена стенами, расположенными квадратом, стороны которого, выходившие на север, восток, юг и запад, были длиной по 75 м каждая. В главном здании находились великолепные жилые помещения, лаборатория, библиотека и четыре большие обсерватории с чердачными помещениями для студентов и наблюдателей. При обсерватории имелись мастерские для изготовления приборов, печатный станок, бумажная фабрика и даже тюрьма для непокорных слуг. Тихо сделал и установил примерно дюжину больших приборов и столько же приборов меньшего размера. Эти приборы

¹⁾ Спустя несколько лет Тихо установил полную стоимость строительства обсерватории. В то время, по его оценке, она достигала 17 000 английских фунтов, что по нынешним временам составляет около 1,5 миллиона долларов.

были лучшими из тех, какие удалось сконструировать и выполнить; они были проградуйрованы и проверены с поразительным искусством и фанатическим стремлением к точности. Некоторые приборы были проградуйрованы с точностью до $\frac{1}{60}^\circ$ и с их помощью можно было измерять даже доли этой величины.



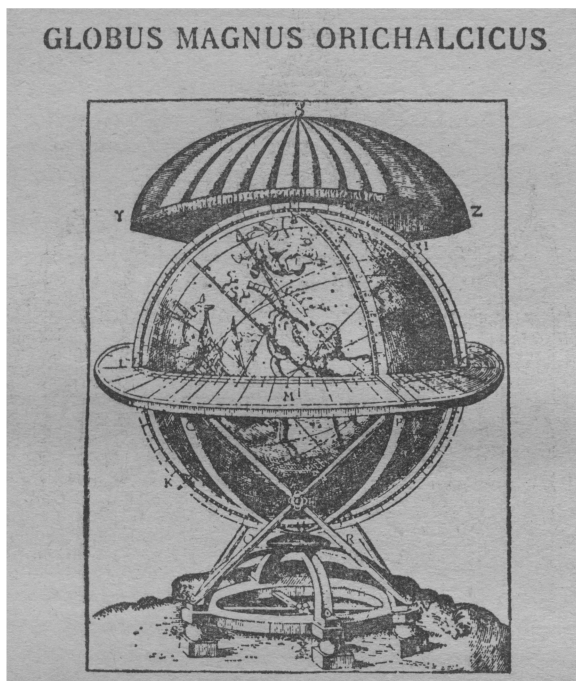
Фиг. 63. Ураниборг.

Эскиз главного здания, построенного примерно в 1580 г.

В библиотеке Тихо установил огромный небесный глобус, который он заказал в Аугсбурге за несколько лет до постройки обсерватории. Глобус был покрыт полированной латунью и представлял собой точную сферу диаметром в человеческий рост. По мере того как проводилась работа в обсерватории, на глобус наносились положения звезд. Эта работа длилась 25 лет.

В лаборатории Тихо находился большой стенной квадрант с движущимися прицелами для наблюдения звезд при их прохождении через отметку в отверстии в противоположной стене. Этот квадрант был одним из главных приборов Тихо, и пустой участок

стены внутри латунной дуги квадранта был украшен большой картиной, на которой были изображены сам Тихо, ведущий наблюдения, ученики, занимающиеся вычислениями, знаменитый глобус, собака, главные приборы, библиотека и обсерватории Ураниборга. На фиг. 65 приведена гравюра, изображающая эту роспись и двух наблюдателей, пользующихся квадрантом и примитивными часами того времени. (По мнению самого Тихо, портрет на стене имел большое сходство с оригиналом.)



Фиг. 64. Большой глобус Тихо Браге.

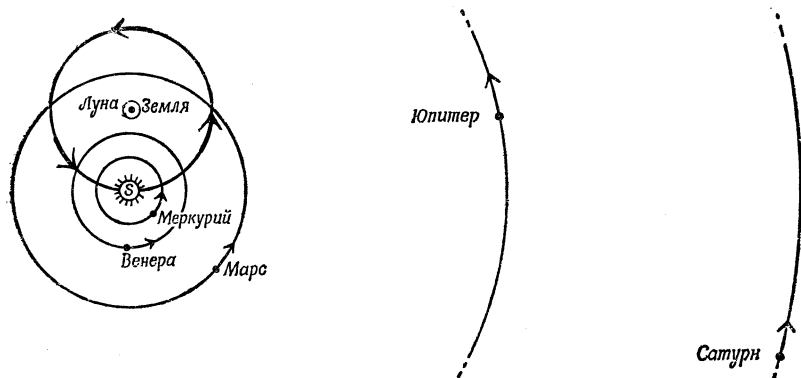
Обсерватория была великолепным храмом науки, и Тихо работал в ней в течение двадцати лет, измеряя и записывая положения звезд и планет с поразительной точностью. Отовсюду к нему съезжались ученики, чтобы работать под его руководством в качестве наблюдателей, регистраторов и вычислителей. Тихо проделал огромную работу — непрерывно наблюдались и регистрировались положения Солнца, Луны и планет. Он был намерен создать тео-

рию, которая правильно описывала бы движения светил. Сначала он не особенно заботился о создании теории, хотя и настаивал на том, что, не располагая теорией, астроном не может успешно заниматься исследованиями. Позднее он предложил полезный ком-



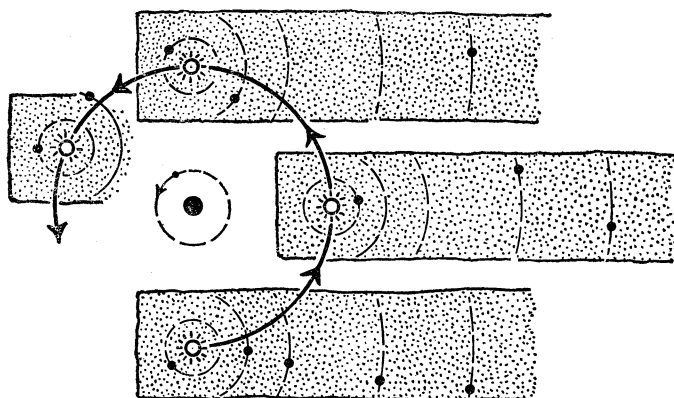
Фиг. 65. Стенной квадрант Тихо Браге.

промисс, служивший как бы переходной ступенью для тех, которые находили скачок от Птолемея к Копернику слишком радикальным. Он предположил, что пять планет (за исключением Земли) движутся по круговым траекториям вокруг Солнца. Вся группа — Солнце, планеты и Луна — вращается вокруг Земли.



Фиг. 66. Движение планет по Тихо Браге.

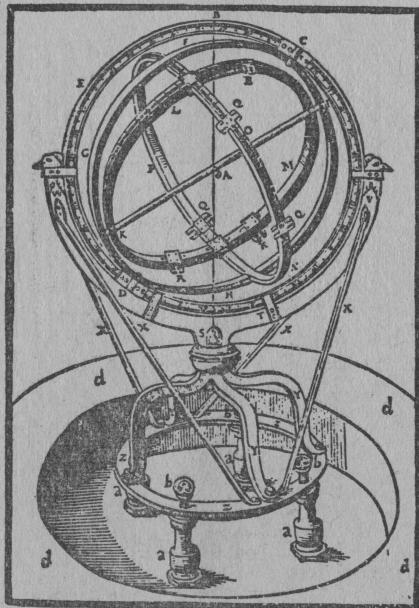
Солнце движется вокруг неподвижной Земли, неся с собой все остальные планеты системы Коперника.



Фиг. 67. Теория движений планет, предложенная Тихо Браге.

Эскиз дан не в масштабе. На нем показаны последовательные положения системы в январе, апреле, июле, сентябре. Планетная система движется подобно сковородке, которую вращает хозяйка, чтобы побыстрее растопить кусок масла.

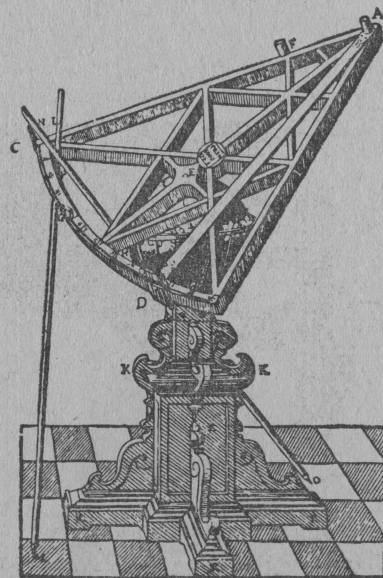
ARMILLÆ ZODIACALES



Фиг. 68. «Астролябия», построенная Тихо Браге по эскизу той, которой пользовался Гиппарх.

Этим прибором непосредственно измерялась широта и долгота звезды или планеты. Тихо построил несколько усовершенствованных приборов, у которых одна из осей была параллельна оси, проходящей через полюса Земли.

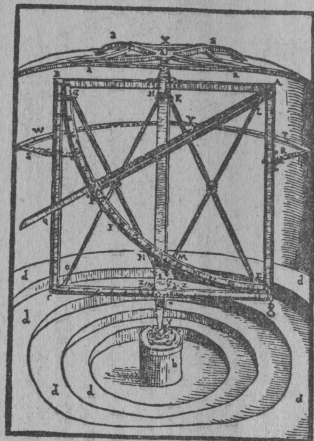
SEXTANS ASTRONOMICUS TRIGONICUS PRO DISTANTIIS RIMANDIS



Фиг. 69. Один из секстантов Тихо Браге.

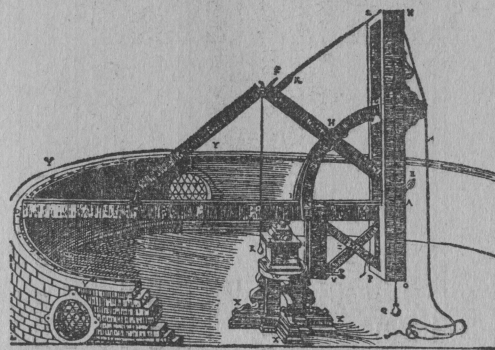
Этот прибор, с латунными шкалами и деревянной рамой, применялся для измерения угла между направлениями, указывающими две различные звезды, причем два наблюдателя смотрели одновременно вдоль плечей AD и AC . Секстант был укреплен на глобусе, который мог вращаться на жесткой подставке так, что ему можно было придать любой наклон. Углы можно было определять с точностью до $\frac{1}{440}^\circ$.

QUADRANS MAGNUS CHALIBEUS.
IN QUADRATO ETIAM CHALIBEO COMPREHENSUS.
UNAQUE AZIMUTHALIS



Фиг. 70. Большой квадрант
Тихо Браге.

PARALLATICUM ALIUD SIVE REGULÆ
TAM ALTITUDINES QUAM AZIMUTHA
EXPEDIENTES



Фиг. 71. Сконструированный Тихо Браге прибор
для измерения высот и азимутов.

Геометрически эта схема эквивалентна схеме Коперника, но в ней отсутствует неприемлемое представление о вращении Земли.

Тихо стал самым выдающимся ученым в Европе. Философы, государственные деятели, многие ученые и даже короли приезжали к нему в обсерваторию. Их принимали с необходимым величием и демонстрировали чудеса замка и собранные в нем приборы. Однако Тихо был вспыльчив и высокомерен с теми, кого считал глупцами, да и с теми, кто, по его мнению, приезжал в обсерваторию, отдавая лишь дань моде. Таким людям он казался грубым и дерзким маленьким человечком со скверным характером, но те, кто был достаточно умен, видели в нем великого и страстного экспериментатора.

Несмотря на страсть к науке, Тихо был тщеславен и суеверен. У него в доме жил придурковатый карлик, и на банкетах, на которых задавала тон его жена, бывшая крестьянка, Тихо заставлял выслушивать высказывания этого карлика, настаивая на том, что они пророческие. «Это, вероятно, был забавный званый обед во главе со странным, неистовым, поразительно умным рыжеволосым человеком с медным носом. Порой он блистал умом и эрудицией, порой же заставлял всех присутствующих, как принцев, так и слуг, сдерживаться и покорно выслушивать бред слабоумного калеки»¹⁾.

Печали и волнения

Хотя обсерватория привлекала отовсюду посетителей, трудный характер Тихо Браге доставлял ему самому немало неприятностей. Тихо обрел врагов при дворе короля, да, кроме того, еще не ладил со своими арендаторами. Когда король пожаловал Тихо в пожизненное пользование остров для строительства обсерватории, крестьяне, имевшие там маленькие фермы, должны были в качестве его арендаторов выполнять для него кое-какую работу. Они сделали немало для строительства Ураниборга, а когда оно закончилось, Тихо принуждал их выполнять поденную работу для себя и своего хозяйства. Держался он высокомерно и предъявлял неразумные требования — иногда даже сажал в тюрьму непокорных. Иной раз жалобы обиженных доходили до короля, и тот принужден был вмешиваться. Король пожаловал Тихо и другие земельные участки, с коих рента должна была поставлять Тихо средства для его собственных нужд и нужд обсерватории.

¹⁾ Из лекции Оливера Лоджа.

А от Тихо требовалось, чтобы он поддерживал эти владения в надлежащем состоянии, к королю же поступали жалобы, что Тихо своих обязательств не выполняет.

Интерес к работе Тихо служил ему защитой перед королем, но когда тот умер, через одиннадцать лет после постройки обсерватории, неприятности начали сыпаться как из рога изобилия. На трон взошел молодой король Христиан IV, окружавшие его придворные относились к Тихо недоброжелательно. Некоторые имения были у Тихо отобраны, и перед ним стал вопрос о будущем. Он написал одному из своих друзей письмо, в котором говорил, что может покинуть остров, утешая себя мыслью, «что для великого человека каждая страна — родина» и что куда бы он ни отправился, над его головой будет то же самое небо. Молодой король относился к Тихо с симпатией, но вынужден был экономить. У Тихо отобрали еще несколько поместий. Видя, что ему не хватит денег на содержание Ураниборга, Тихо покинул остров и переехал на материк. Почувствовав недоброжелательное к себе отношение, он решил расстаться с неблагодарной родиной и искать нового покровителя и нового места для работы. С собой он взял лишь те приборы, которые были сравнительно невелики, и разместил их на временной квартире в Германии, ведя тем временем переговоры с императором Богемии Рудольфом — просвещенным правителем, очень интересующимся наукой. Тихо Браге написал длинное высокомерное письмо королю Дании Христиану, в котором соглашался вернуться на родину, но получил весьма прохладный ответ. Тем временем он напечатал большой иллюстрированный каталог своих приборов и разослал изящно переплетенные копии возможным покровителям, включая Рудольфа.

Новая обсерватория в Праге

После двух лет странствий Тихо наконец прибыл в Прагу, где был гостеприимно встречен Рудольфом, который предоставил для обсерватории замок и обещал щедрое содержание. Император искренно интересовался астрономией (и, вероятно, астрологией), но был беспечным правителем и не всегда полностью выплачивал Тихо обещанные деньги. Однако он помог Тихо восстановить свою обсерваторию и спас таким образом его работы. Таблицы Тихо Браге, которые были затем опубликованы, получили название «Рудольфовых таблиц».

В новом замке жизнь Тихо протекала так, как в Дании. Он перевез свои большие приборы из Дании через Германию и собрал

вокруг себя небольшую школу астрономов и математиков. Но дух его был сломлен: он был чужестранцем в чужой стране. Он продолжал свои наблюдения и начал составлять «Рудольфовы таблицы», но все более и более падал духом. Прожив в Праге менее трех лет, он тяжело заболел и умер. Во время болезни, в бреду он часто восклицал «*Ne frustra vixisse videar*» («О, неужели я жил напрасно!»). Всю жизнь до дня смерти он посвятил достижению великой цели. Высказанное им сомнение не заслужил великий астроном, составивший каталог тысячи звезд так точно, что его наблюдения полезны и до сих пор, человек, в течение двадцати лет записывавший положения планет с точностью до $1/60^\circ$, ученый, чьи наблюдения стали основой работ Кеплера и Ньютона. Он преуспел в своих намерениях, и его труды представляют собой огромный вклад в науку. Нет, его жизнь не была прожита напрасно.

Перед самой смертью, находясь еще в сознании, Тихо собрал вокруг себя своих близких, просил их сохранить его труды и доверил одному из своих учеников, Иоганну Кеплеру, исправление и публикацию своих таблиц. Большие приборы некоторое время сохранялись, но во время последующих войн погибли; до наших дней сохранился только большой небесный глобус. Обсерватория на острове Вен была разрушена, и сейчас от нее почти не осталось следов. Дания утратила свой престиж научного центра, и лишь в этом веке слава ее возродилась, на этот раз благодаря Нильсу Бору.

Задача 1. Точность наблюдений Тихо Браге

Обычно Тихо проводил свои наблюдения с помощью отвесов и визиров, подобных ружейным прицелам. Его окончательные результаты характеризовались точностью до $1/60^\circ$ (т. е. до одной минуты). Чтобы уяснить, насколько тщательно он должен был производить свои измерения, ответьте на следующие вопросы:

- а) Предположим, что Тихо засекал в визиры планету и что эти визиры были соединены со шкалой, проградуированной в градусах; на этой шкале он мог отмечать положение вертикальной линии. Предположим, что угловая шкала была частью круга радиусом около 2 м. Современный транспортир обычно имеет радиус, равный примерно 7,5 см. Насколько тонкой должна была быть нить его отвеса, чтобы ошибка, равная одной толщине нити на шкале, соответствовала ошибке в 1 минуту при измерении угла? (Выразите ответ в долях сантиметра.) (У к а з а н и е. При $r=2$ м длина всей шкалы, соответствующая 360° вдоль окружности, была бы ... Тогда 1° должен соответствовать участку шкалы длиной ... Тогда 1 минута должна соответствовать ...)
- б) С чем можно сравнить найденную вами величину — с толщиной веревки, струны, нити, паутины?

Задача 2

Чем объяснить, что короли зачастую покровительствовали астрономам?

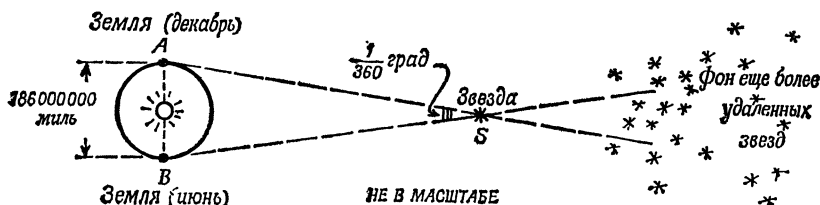
Задача 3. Параллакс и звезды

а) Предположим, что звезды некоторой группы или созвездия, кроме одной, удалены от Земли на бесконечно большое расстояние, и эта единственная звезда находится от нас на расстоянии всего несколько миллиардов километров. Как будет выглядеть ее параллакс? Опишите траекторию (видимого) движения близкой звезды

1) вблизи эклиптики?

2) вблизи полюса эклиптики (под углом 90° от эклиптики)?

б) Чтобы решить, мог ли Тихо Браге надеяться на то, что обнаружит очень незначительный параллакс ближайших неподвижных звезд, попробуйте произвести следующее вычисление. За 6 месяцев Земля пройдет по своей орбите



Фиг. 72. К задаче 3.

Не в масштабе — реальный угол всего $1/360^\circ$.

путь от одного конца диаметра до другого, равный 186 000 000 миль от А к В (фиг. 72). Предположим, что Тихо наблюдал очень близкую звезду S на фоне других звезд, находящихся на гораздо большем расстоянии. Наблюдая положение звезды S относительно фона, Тихо должен был бы измерить угол ASB как угловое смещение звезды S на фоне более удаленных звезд. Предположим, что этот угол равен $1/360^\circ$. Представляется сомнительным, чтобы можно было обнаружить сдвиг меньше этой величины. Постарайтесь с помощью простых арифметических расчетов ответить на следующие вопросы:

1) Приняв, что угол ASB равен $1/360^\circ$, определите расстояние AS звезды от Земли. Воспользуйтесь методом, аналогичным тому, который описан в задаче 1, — прибегайте к тригонометрии для определения крайних углов. (Считайте, что дуга AB с центром в S равна 186 000 000 $\approx$ 200 000 000 миль.)

2) Сравните полученный в ответе на первый вопрос результат с современными измерениями. При измерении подобных расстояний обычно их выражают через промежутки времени, в течение которых свет проходит искомое расстояние. Свет проходит расстояние, равное диаметру земной орбиты AB, приблизительно за 16 минут (а от Солнца до нас за 8 минут). Свет от ближайшей звезды доходит до нас примерно через 4 года (около 2 000 000 минут). Какому углу ASB соответствует это значение? (Избегайте тригонометрии, пользуйтесь простыми пропорциями.)

Кромешною тьмою окутан навечно,
Как в бездне витая во мраке Вселенной,
Хвалу я богам возношу бесконечно,
Что душу мою сохранили нетленной.

В. Хенли (1875 г.)

«...музыка есть повсюду, где есть гармония, порядок, пропорция, и до сих пор мы можем считать, что существует музыка сфер, так как упорядоченные движения и правильные интервалы, хотя и не воспринимаются слухом, но исполнены гармонии для нашего разума».

*Сер Томас Браун,
Religio Medici (1642 г.)*

Молодой немец Иоганн Кеплер, которому Тихо Браге оставил свои таблицы, вполне заслуживал такого доверия. Он стал одним из величайших ученых своего века, и равным ему, пожалуй, можно считать лишь Галилея, а позднее его смог затмить только Ньютон. Как указывает Оливер Лодж¹⁾, Тихо и Кеплер были поразительно разными: Тихо «аристократического происхождения, богатый, сильный, пылкий, обладающий талантами изобретателя и экспериментатора, но как теоретик и математик не выше среднего уровня». А Кеплер «бедный, болезненный, отнюдь не обладающий способностями как экспериментатор и склонностью к точным наблюдениям, но блестящий математик с тонкой интуицией». Работой Тихо интересовались короли, они оказывали ему покровительство и материальную поддержку (в течение некоторого периода довольно значительную). Жизнь Кеплера была полна лишений и неудач. Но обоих объединял глубокий интерес к астрономии и твердое решение осуществить поставленные перед собой задачи.

Кеплер родился в Германии в семье армейского офицера. Он был старшим сыном. Рос он слабым ребенком, сильно болел и часто жизнь его висела на волоске. Родители его были так бедны, что им пришлось открыть сельскую таверну, чтобы сводить концы

¹⁾ Oliver Lodge, *Pioneers of Science*, London, 1893.

с концами. Когда маленькому Иоганну исполнилось девять лет, его взяли из школы и до двенадцати лет он прислуживал в таверне. Затем он вернулся в школу, а потом поступил в университет, который благополучно окончил, считаясь вторым в своей группе. Тем временем отец его вернулся в армию, а мать перессорилась со всеми родственниками, включая и сына, который был счастлив удрать из дома. Сначала Кеплера не очень интересовала астрономия. В университете он познакомился с теорией Коперника, стал ее сторонником, защищал ее во время университетских дискуссий и даже написал по поводу этой теории реферат. Но в то время его основные интересы лежали в области философии и религии, и он не уделял времени астрономии. Однако когда оказалась свободной вакансия лектора по астрономии, Кеплер, который в то время искал работу, скрепя сердце занял это место, заявив, что не оставляет надежды «получить возможность заняться более интересным делом». В те дни астрономия не пользовалась тем уважением, которое позднее сам Кеплер помог ей приобрести. Тем не менее он начал серьезно заниматься наукой, которую ему предстояло преподавать; и чем больше он изучал астрономию и думал о ней, тем больше увлекался и тем больше новых идей роилось в его голове. «Он был прирожденным мыслителем, подобно тому как Моцарт был прирожденным музыкантом», — говорит Лодж. Он *должен* был найти математическую схему, лежащую в основе планетной системы. Его беспокойный пытливый ум и пылкое воображение занимали задачи, связанные с числами и размерами¹⁾. Как и Пифагор, «он был убежден, что бог создал мир в соответствии с принципом идеальных чисел и что поэтому лежащая в основе мироздания математическая гармония... является реальной и доступной пониманию причиной движения планет»²⁾. Сам Кеп-

1) Большинство людей увлекается подобными загадками, хотя не столь пылко. Вам, вероятно, часто доставляло удовольствие решать задачи с последовательностями чисел, где вы пытались продолжить эти последовательности закономерным образом (проверка на сообразительность, различные головоломки). Попробуйте продолжить приведенные здесь последовательности. Если вам удастся это сделать и вы получите при этом удовольствие, вам станет до некоторой степени понятно то наслаждение, которое испытывал Кеплер при решении поставленных им перед собой задач.

а) 1, 3, 5, 7, 9, 11, ...?

д) 4, 7, 12, 19, 28, ...?

б) 1, 4, 9, 16, 25, ...?

е) 1 7 3 6 5 5 7 4 9, ...?

в) 5, 6, 7, 10, 11, 12, 15, 16, ...?

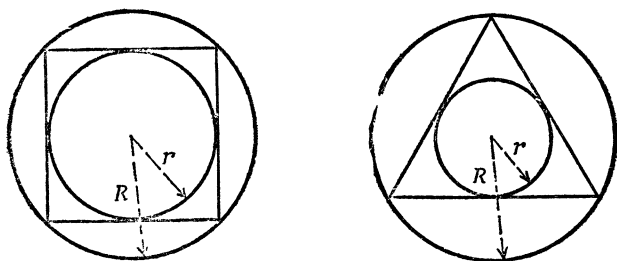
ж) 0 1 8 8 1 1 0 2 4 1 5 6 2 5, ...?

г) 2, 3, 4, 6, 8, 12, 14, 18, ...?

В последовательностях (е) и (ж) вы должны проставить запятые.

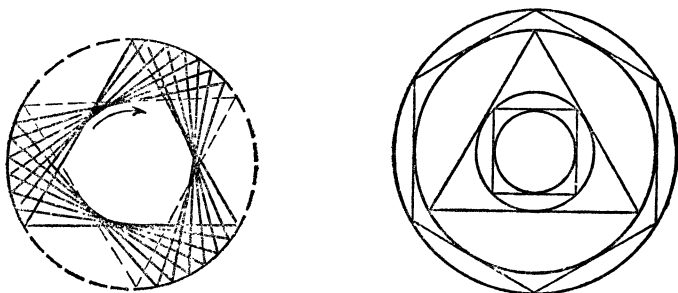
2) William D a m p i e r, A History of Science, Cambridge, 1949.

лер сказал: «Я размышлял над этим вопросом со всей энергией, на которую был способен мой ум».



Фиг. 73. Первая гипотеза Кеплера.

В правильный многоугольник (например, квадрат) можно вписать окружность так, чтобы она касалась его сторон. Можно также описать окружность, проходящую через вершины квадрата. Для этой окружности можно в свою очередь построить правильный многоугольник, в который она будет вписана. Отношение радиусов R/r этих окружностей будет одинаково для всех квадратов; другое значение R/r будет иметь место для всех треугольников. *Геометрическая задача:* каково будет отношение R/r для внутреннего и внешнего круга в случае квадрата? в случае треугольника?



Фиг. 74. Те же две окружности, полученные вращением правильного многоугольника (в данном случае треугольника).

Вращение происходит вокруг центра, в плоскости треугольника. Вершины его будут лежать на внешней окружности, а стороны, сколько, образуют внутреннюю окружность.

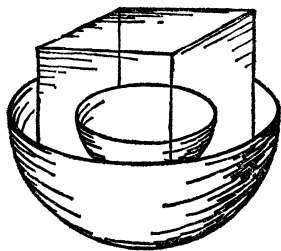
Фиг. 75. Окружности, образованные рядом правильных многоугольников, разделенных внутренними и внешними окружностями.

Окружности можно подобрать так, чтобы их размеры соответствовали соотношениям размеров орбит планет. Однако даже при самом удачном выборе многоугольников не удастся получить модели Солнечной системы.

Ум его пылал, он мучился вопросами: Почему существует только *шесть* планет? Почему их орбиты имеют именно такие пропорции и размеры? Связаны ли «периоды обращения» планет с размерами их орбит? Первый вопрос, «Почему именно шесть?», харак-

терен для того времени. В наше время мы должны были бы искать седьмую планету. Но тогда казалось, что факты непреложны и что числа обладают магическими свойствами. В системе Птолемея насчитывалось семь планет (включая Солнце и Луну и исключая Землю) и даже доказывалось, что их столько и должно быть.

Кеплер пытался снова и снова найти простое соотношение, связывающее радиус одной орбиты с радиусом следующей. На основании наблюдений, проведенных Тихо Браге, Кеплер вычислил, что радиусы орбит в системе Коперника приблизительно относятся как $8 : 15 : 20 : 30 : 115 : 195$. Он пытался познать тайну



Фиг. 76. Вторая гипотеза Кеплера.

Этот рисунок иллюстрирует схему Кеплера, который пытался так расположить правильные многогранники, чтобы получить наилучшее согласие с известными соотношениями размеров орбит различных планет.

этих отношений. Каждая догадка стоила ему немало труда, и каждый раз, когда оказывалось, что она не соответствует фактам, Кеплер честно от нее отказывался. Его мистически настроенный ум заставлял его считать, подобно древним грекам, что окружности — идеальные формы. Одно время он думал, что можно построить модель орбит, по которым движутся планеты, следующим образом: начертить окружность, вписать в нее равносторонний треугольник, затем вписать в этот треугольник еще окружность, в нее снова треугольник и т. д. Эта схема состоит из ряда окружностей, радиусы которых относятся как $2 : 1$. Кеплер надеялся, что можно построить такие окружности, отношения радиусов которых будут соответствовать отношениям радиусов орбит, если пользоваться вместо треугольников квадратами, шестиугольниками и т. д. Однако такие построения оказывались неудовлетворительными, и однажды он воскликнул: «Почему фигуры, помогающие получить орбиты в пространстве, должны быть плоскими? Надо пользоваться объемными фигурами». Он знал, что существует всего пять правильных многогранников. Греческие математики доказали, что их может существовать не более пяти. Попытавшись осуществить с помощью пяти таких многогранников систему из шести сфер, Кеплер нашел, что этим сферам будет соответствовать шесть определенных орбит.

Правильные многогранники

Сколько может существовать различных правильных многогранников?

Правильный многогранник — это геометрическое тело с одинаковыми правильными плоскими гранями, т. е.

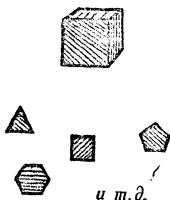
все ребра имеют одинаковую длину
все плоские углы одинаковы
все пространственные углы одинаковы
все грани имеют одну и ту же форму

(на фиг. 77, 'а даны примеры многогранников, не удовлетворяющих этим требованиям).

Например, куб — правильный многогранник.

Грани правильного многогранника могут представлять собой:

равносторонние треугольники
квадраты
правильные пятиугольники
и т. д.



Опыт 1. Доказательство для граней, представляющих собой квадраты. Попробуйте построить угол правильного многогранника из нескольких плоских прямых углов.

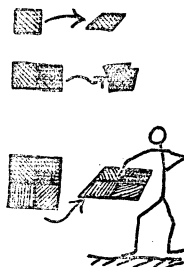
Мы уже знаем, что каждый угол куба образуется пересечением трех его граней. Возьмите три квадратных куса картона, положите их на стол, затем попробуйте приподнять их, ухватившись за то место, где встречаются все три угла квадратов.

Квадратные куски картона образуют при этом трехгранный угол куба.

Поэтому мы можем сделать правильный многогранник, каждый угол которого будет образован пересечением трех квадратных граней. (Нам понадобится еще три квадратных куска картона, чтобы сделать весь куб.)

Можем ли мы сделать иной правильный многогранник с одной или двумя, или четырьмя квадратными гранями, пересекающимися между собой?

Из одного квадрата мы не можем образовать многогранный угол.



С двумя квадратами мы получим лишь плоский двугранный угол.

С тремя квадратами мы получим трехгранный угол куба.

С четырьмя квадратами нельзя получить угол многогранника; их углы, смыкаясь, образуют плоскость.



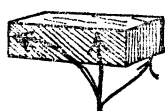
Таким образом, с помощью квадратов можно построить лишь один правильный многогранник — куб.

Опыт 2. Попробуйте теперь образовать многогранник с помощью правильных пятиугольников. Сколько правильных многогранников можно голучить, пользуясь гранями такой формы?

Попробуйте выполнить аналогичную задачу с шестиугольниками и другими многоугольниками.

В ы в о д. Только пять различных многогранников могут существовать в нашем трехмерном мире (фиг. 77, б).

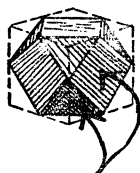
(Обращаем ваше внимание на то, что для доказательств, которыми



Ребра должны быть равными



Углы граней должны быть одинаковыми

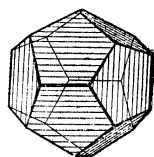
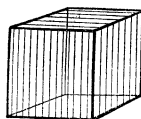
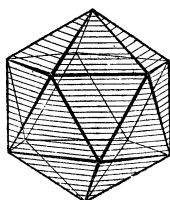
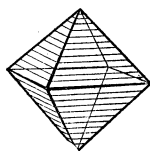
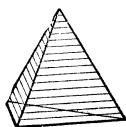


Все грани должны быть одинаковыми



Все пространственные углы должны быть одинаковыми

а



б

Фиг. 77. Многогранники.

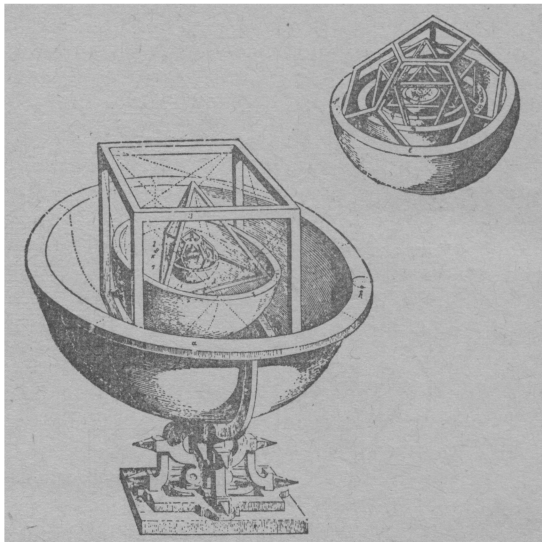
а — неправильные; **б** — правильные.

Попробуйте построить правильные многогранники с помощью треугольников.

мы здесь пользовались, необходимы не только эскизы, сделанные карандашом, но и модели из картона.)

Казалось, что найдено чудесное объяснение того, почему существует только шесть планет. Строя систему планет, Кеплер начал со сферы для земной орбиты, построил вокруг нее додекаэдр так, чтобы его грани соприкасались со сферой, затем описал вокруг этого додекаэдра другую сферу так, чтобы она проходила через его вершины; на этой сфере должна была лежать орбита

Марса; вокруг этой сферы он построил тетраэдр, затем сферу для Юпитера, затем куб, затем сферу для Сатурна. Внутри земной сферы он поместил еще два многогранника, разделенные сферами, чтобы получить таким образом орбиты Венеры и Меркурия. Относительные радиусы сфер, вычисленные на основе геометрии, находились в соответствии с известными в то время относительными радиусами орбит планет, и Кеплер был в восторге: «Огромную



Фиг. 78. Схема Кеплера с правильными многогранниками (заимствовано из его книги).

Относительные размеры орбит планет показаны шаровыми оболочками, отделяющими один многогранник от другого. Толщина этих шаровых оболочек подобрана таким образом, чтобы учитывался эксцентриситет орбит.

радость, которую я испытал от этого открытия, нельзя выразить словами. Я уже не жалел о потраченном времени и не испытывал усталости; я не боялся трудных расчетов, не считал проведенных за вычислениями дней и бессонных ночей, стремясь выяснить, соответствует ли моя гипотеза теории орбит Коперника, или же моя радость должна рассеяться как дым».

Теперь мы знаем, что это был лишь случайный успех. В более поздние годы Кеплеру самому пришлось подгонять соотношения радиусов своих сфер, чтобы они соответствовали фактам, а когда спустя несколько столетий были открыты другие планеты, схема

Кеплера оказалась совершенно несостоятельной¹⁾. И все же этот «успех» привел Кеплера к дальнейшим великим открытиям.

Кеплер опубликовал свое открытие в книге, где привел также описание всех своих неудачных попыток. Столь необычный характер изложения присущ многим его сочинениям. Он рассказывал о том, *как совершались* его открытия. Он не боялся нанести вред своей репутации и лишь желал способствовать росту человеческих знаний, поэтому не скрывал своих ошибок, а подробно их описывал. «Ибо я считаю, — писал он, — что те пути, с помощью которых люди приобрели знания о небесных явлениях, не менее достойны восхищения, нежели сами открытия... Христофору Колумбу, Магеллану, португальцам не просто прощают их подробные описания странствий, было бы очень обидно, если бы этих описаний не было, и мы не могли бы наслаждаться, читая их; пусть и меня не порицают за то, что я поступаю точно так же».

Кеплер в своей книге превосходно защищал систему Коперника, используя веские доводы. Кеплер послал экземпляры своей книги Тихо Браге и Галилею, которые одобрили его смелое начинание. С этого времени возникла дружба Кеплера с этими великими людьми, продолжавшаяся всю жизнь²⁾. В той же книге Кеплер высказал предположение, что каждая планета движется по своей орбите вследствие влияния, которое оказывает на нее Солнце — это была смутная и маловероятная идея, которая помогла ему позднее открыть свой второй закон.

Кеплер был протестантом и под давлением католической церкви его лишили работы. Беспокоясь о своем будущем и стремясь посоветоваться с Тихо Браге по поводу наблюдений над движением планет, он переехал в Прагу. В то время Тихо Браге наблюдал за «трудной планетой» — Марсом; он писал Кеплеру: «Приезжайте не как чужестранец, а как друг; приезжайте и помогите мне вести наблюдения с теми приборами, которыми я располагаю». Пока продолжалась работа в обсерватории, Тихо пытался разработать

¹⁾ И сейчас имеется грубое эмпирическое правило, связывающее радиусы орбит друг с другом, так называемый закон Боде; но до недавних пор этому правилу не могли найти объяснения.

²⁾ В более позднем издании Кеплер специально постарался оттенить достижения Галилея. В одной из своих отвергнутых теорий он предполагал существование планеты между Марсом и Юпитером. Из боязни, что читатель может заподозрить его в том, что он претендует на открытие луны Юпитера, он добавил следующее примечание об этой планете: «Она не вращается вокруг Юпитера подобно звездам Медичи. Не ошибитесь. Я никогда не предполагал заранее, что они существуют».

подробную «теорию», создать схемы, которые бы поясняли его многочисленные наблюдения. Кеплер присоединился к Тихо Браге, пытаясь вместе с ним найти круговую орбиту Марса, которая соответствовала бы наблюдениям. Обидчивый и большой, Кеплер жаловался на то, что Тихо якобы обращался с ним как с учеником и не очень-то делился своими наблюдениями. Однажды, почти обезумев от усталости, он написал Тихо гневное письмо, полное несправедливых упреков, но Тихо мягко убедил его в том, что он неправ, и Кеплер, раскаявшись, писал ему:

«Высокочитимый Тихо,

как я смогу перечислить или должным образом оценить те милости, которыми вы меня осыпали? В течение двух месяцев вы щедро и безвозмездно поддерживали меня и мою семью... вы оказывали мне всевозможные одолжения; вы передали мне то, что было вам особенно дорого... Я не могу без ужаса думать о том, что бог отступился от меня и предоставил меня моей собственной невыдержанности, дошедшей до такой степени, что я закрыл глаза на все ваши благодеяния; что вместо скромной и почтительной благодарности я позволил себе в течение трех недель неприязненно относиться к вашей семье и с безудержным гневом и крайней дерзостью к вам... Все, что я сказал или написал... против вашего превосходительства... я... признаю бездоказательным, фальшивым и лишенным всякой почвы».

После того как Кеплер вернулся в Германию, Тихо Браге вновь пригласил его, предложив ему на этот раз постоянное сотрудничество. Кеплер принял приглашение, но отсутствие денег и болезнь задержали его переезд, и когда он наконец достиг Праги, то оказался совсем без средств и в полной зависимости от Тихо. Тихо Браге исходил для Кеплера должность «императорского математика»; обязанности его заключались в том, что он должен был помогать Тихо Браге составлять таблицы движений планет.

Вскоре после этого Тихо Браге умер, завещав Кеплеру опубликование своих таблиц. Хотя Кеплер все еще сохранял свою должность императорского математика, платили ему неаккуратно и он очень бедствовал. Одно время он даже стал публиковать альманах с предсказаниями судеб. Сама идея вызывала в нем отвращение, но он крайне нуждался в деньгах и знал, что астрология — та форма астрономии, за которую платят. До конца жизни, еще выше четверти века, он занимался исследованием движений планет, стремясь узнать те простые законы, которым, как он был уверен, они должны были подчиняться.

Исследование Марса

К моменту кончины Тихо Браге Кеплер уже начал свои исследования, изучая главным образом движение Марса. С помощью какой схемы можно было бы описать орбиту Марса? Пользуясь представлением о круговых орбитах, Кеплер предположил, что планета движется по кругу, на некотором расстоянии от центра которого находится Солнце (подобно эксцентрично расположенной Земле по Птолемею, см. стр. 83). Затем он поместил точку Q по обе стороны от центра круга и провел от нее плечо к планете, считая, что оно должно вращать планету с постоянной скоростью вокруг Солнца. Он не настаивал подобно Птолемею, чтобы эксцентричные расстояния CE и CQ были равны, но вычислил для них подходящие пропорции на основе некоторых наблюдений Тихо Браге. Затем, предположив, что планета движется по такой орбите, Кеплер сравнил ее последующие положения с данными Тихо. Не зная, какое положение в пространстве занимает линия ECQ , он, выбрав наугад направление, пытался так расположить круговую орбиту, чтобы получить соответствие с наблюдениями. Каждая такая попытка требовала долгих и утомительных вычислений. Кеплер произвел 70 таких попыток, прежде чем нашел направление и пропорции, которые находились в хорошем соответствии с дюжиной ранее измеренных долгот Марса. Его очень обрадовали эти результаты, но затем, к его разочарованию, оказалось, что схема плохо согласуется с широтами Марса. Он подогнал свои эксцентрические сдвиги так, чтобы они удовлетворяли этим широтам, однако на некоторых участках орбиты вычисленное положение Марса расходилось с наблюдениями на $8'$ (8 шестидесятых долей градуса). Не могло ли столь малое расхождение объясняться ошибками наблюдений? Нет. Кеплер знал Тихо Браге и был уверен, что тот не мог допустить подобной ошибки. Тихо Браге уже не было в живых, но Кеплер доверял его записям. Это было большой и справедливой данью Кеплера по отношению к своему другу. Верный памяти Тихо и хорошо знакомый с его методами, Кеплер верил ему больше, чем своей, казалось бы столь успешной, теории. Он храбро принялся снова за утомительную работу, заявив, что на основе этих восьми минут должен построить теорию Вселенной.

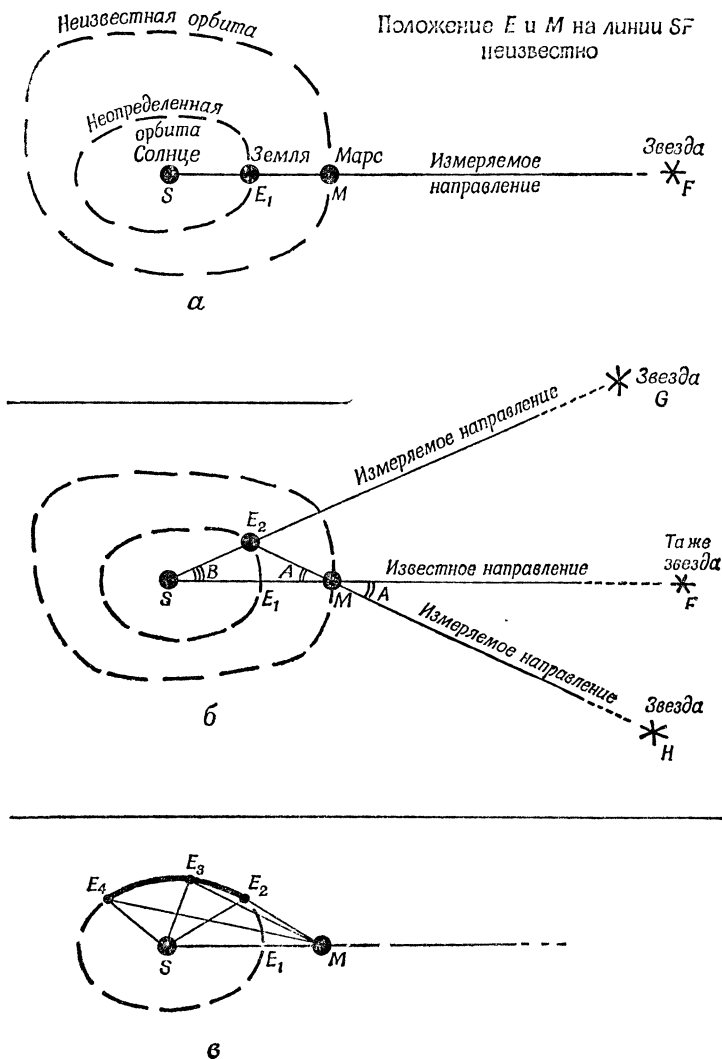
Ему стало ясно, что круговая орбита не соответствует действительности. Однако чтобы определить, какова же на самом деле форма орбиты, он должен был получить точное изображение орбиты Марса. Это было отнюдь не простой задачей, так как с дви-

жущейся Земли можно наблюдать лишь видимую траекторию Марса. Истинные расстояния были неизвестны; были измерены только углы, которые характеризовали лишь комбинацию орбитальных движений Марса и Земли. Тогда Кеплер попытался сперва определить орбиту Земли с помощью метода, который по справедливости можно назвать гениальным.

Определение орбиты Земли в пространстве и времени

Чтобы нанести на диаграмму орбиту Земли, по которой она движется вокруг Солнца, нужно произвести много серий измерений, определяющих положения Земли из двух неподвижных точек. Кеплер взял за одну из этих точек Солнце, за другую — Марс *в различные моменты времени, когда он находился в одном и том же положении на орбите*. Кеплер действовал таким образом: он отмечал «положение» Марса на фоне звезд при противостоянии (по отношению к Солнцу, в полночь, прямо над головой). Отсюда он определял направление базы Солнце — (Земля) — Марс, SE_1M (фиг. 79). Затем находил в записях Браге время, *в точности* соответствующее тому, которое прошло с данного момента *за один марсианский год*. (Марсианский год, т. е. время, в течение которого Марс совершал полный оборот по своей орбите, был точно известен из записей, которые велись в продолжение столетий.) Теперь Кеплер знал, что Марс находится в этом же самом положении M и что SM имеет то же направление. К этому времени Земля успевала перейти в положение E_2 на своей орбите. Произведенная Тихо запись положения Марса на фоне звездного неба давала Кеплеру новое направление, E_2M , а положение Солнца давало ему направление E_2S . Он мог определить углы треугольника SE_2M следующим образом: зная направления E_1M и E_2M (отмеченные на небесной звездной сфере), он мог вычислить угол A между ними. Зная направления E_1S и E_2S , он мог вычислить образуемый ими угол B . Затем на диаграмме он мог выбрать две точки, изображающие S и M , и определить положение Земли E_2 , из концов базы SM провести прямые под углами A и B и найти их пересечение E_2 . Спустя один марсианский год он мог определить направления E_3M и E_3S из записей Тихо Браге и найти потом E_3 на своей диаграмме. Таким образом, Кеплер, начав с точек S и M , мог определить точки $E_2, E_3, E_4, \dots$, что позволяло при достаточно большом числе точек определить форму орбиты.

Зная теперь истинную орбиту Земли, он мог провести исследование в обратном порядке и определить форму орбиты Марса.



Фиг. 79. Схема Кеплера определения орбиты Земли.

α — направление, измеряемое в момент противостояния Марса; β — спустя один марсианский год Марс должен быть в том же положении; γ — построение земной орбиты.

Он убедился, что орбиту Земли можно считать кругом со слегка смещенным центром, т. е. несколько напоминающей овал; но орбита Марса не имела сходства с кругом, она представляла собой вполне определенный овал, или же, как он считал вначале, имела яйцевидную форму; Кеплер все еще не мог найти ее математическое выражение.

Переменная скорость планет. Второй закон

Изучая движение Земли в пространстве, Кеплер заметил, что она движется по своей орбите неравномерно, быстрее зимой, чем летом. Он стал искать закон, по которому происходит изменение скорости и который мог бы заменить искусственный прием введения экванта. На мысль о существовании такого закона наводила прежняя гипотеза об импульсе, получаемом планетами от Солнца. Кеплер считал, что движение должно поддерживаться силой, поэтому у него возникло представление о некоем «плече», идущем от Солнца к каждой планете и толкающем планету *вдоль* орбиты, и чем дальше расстояние, тем слабее должен быть толчок. Кеплер пытался (с помощью сложной геометрической схемы) сложить действия таких толчков от расположенного эксцентрично Солнца и открыл простой закон: *радиус-вектор, проведенный от Солнца к планете, описывает одну и ту же площадь за равные промежутки времени*. Этот радиус-вектор не вращается вокруг Солнца с постоянной скоростью (как хотелось бы Птолемею), но в его движении имеется некоторое постоянство — постоянная скорость прохождения одной и той же площади (Птолемею, вероятно, понравилось бы такое соотношение).

Рассмотрим, чему будут равны эти площади для равных промежутков времени, скажем за каждый месяц. Когда планета находится далеко от Солнца, радиус-вектор будет проходить за месяц длинный узкий треугольник; по мере приближения планеты к Солнцу треугольники будут становиться короче и шире — планета будет двигаться быстрее. Позднее, когда Кеплер уже знал форму орбиты Марса, он применил то же правило и нашел, что оно справедливо и для Марса. Таким образом, он получил простой закон, определяющий скорости планет: каждая планета движется вокруг Солнца с такой скоростью, что радиус-вектор, проведенный от Солнца к планете, описывает равные площади за равные промежутки времени. Кеплер высказывал лишь смутные догадки о «причине» такого явления, считая его результатом влияния Солнца, возможно магнитного происхождения; но он ценил этот

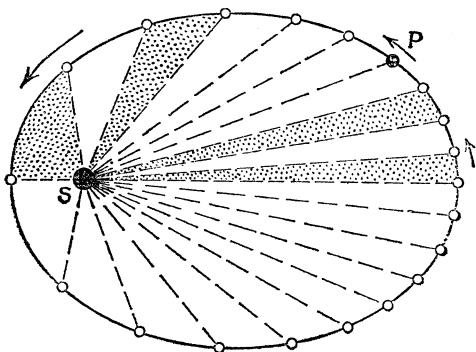
закон за его простоту и четкость и пользовался им при дальнейших исследованиях. Мы называем этот закон *вторым законом Кеплера*. Первый закон Кеплера, открытый им вскоре после этого, определяет истинную форму орбит планет.

Орбита Марса. Первый закон

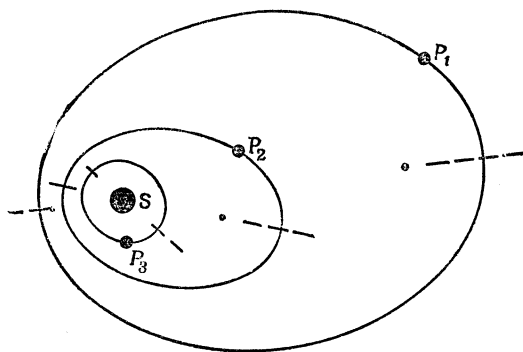
Начертив орбиту Марса (по сорока тщательно вычисленным точкам), Кеплер попытался дать математическое выражение для ее овальной формы. Он испытывал бесконечные затруднения, одно

Фиг. 80. Определение орбиты Марса по Кеплеру.

Орбита Марса представляет собой эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце. Плечо, идущее от Солнца к планете, описывает равные площади за равные промежутки времени. На окружности эллипса отмечены положения планеты через промежутки времени, равные $1/20$ времени обращения Марса (марсианского года). Скорость планеты при ее движении по орбите меняется так, что все указанные здесь секторы имеют одинаковые площади.



время даже говорил, что почти сходит с ума от тех трудностей, которые ему приходится испытывать. Желая получить финансовую



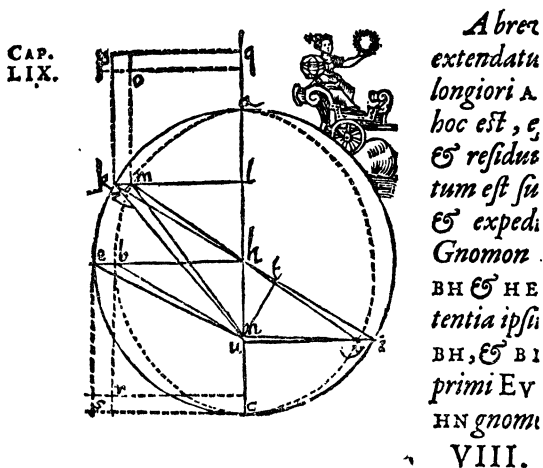
Фиг. 81. Солнечная система с окружающими Солнце эллиптическими орбитами.

Орбиты планет в нашей Солнечной системе имеют значительно меньшие эксцентриситеты. Кометы движутся по эллиптическим орбитам с большими эксцентриситетами.

поддержку, он писал императору в присущем ему напыщенном стиле: «Торжествуя победу над Марсом и приготавливая для него, как для побежденного, тюремные своды таблиц и оковы эксцент-

риков, я слышу то там, то тут шепот, что моя победа напрасна и что война бушует снова. Так как враг остался в доме, презренный пленник разорвал все цепи уравнений и вырвался из тюрьмы таблиц».

Наконец, Кеплер нашел истинную орбиту Марса; она была заключена между эксцентрическим кругом, который был слишком велик



Si circulus dividatur in
tas partes; & puncta division

Фиг. 82. Диаграмма Кеплера из его книги о Марсе.

по сравнению с ней, и вписанным внутрь круга эллипсом, который был слишком узок. И круг и эллипс расходились с наблюдениями, круг на $+8'$ в некоторых участках орбиты, а внутренний эллипс на $-8'$. Кеплер внезапно понял, что орбита должна представлять собой эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце. Убедившись в правильности своего предположения, он был так восхищен, что украсил свой чертеж изображением победоносной Астрономии на триумфальной колеснице, чтобы подчеркнуть значение полученного им доказательства (фиг. 82). Наконец-то он

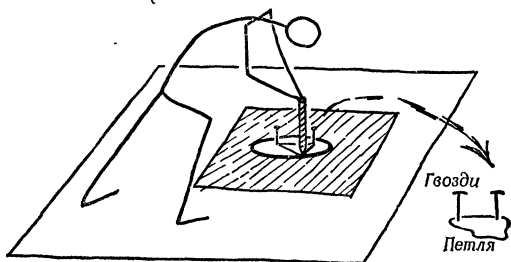
определил истинную орбиту Марса¹⁾. Подобное же правило оказалось справедливым для Земли и других планет. В этом и состоит *первый закон Кеплера, т. е. каждая планета движется по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце.*

Третий закон

Таким образом, с помощью таблиц Тихо Браге, благодаря бесстрашию, уму и неустанной работе Кеплер вывел два великих «закона». Он продолжал размышлять над одним из тех вопросов, которые интересовали его и ранее: какова связь между размерами орбит планет и длительностью их периодов обращения? Теперь ему были известны радиусы²⁾ орбит, а периоды их обращения были известны с давних пор. (Как предполагали древние греки, планеты с большими периодами обращения имеют большие орбиты.) Он был уверен, что между радиусом планеты и ее периодом обращения должно существовать определенное соотношение. Кеплер делал много попыток найти такое соотношение, но большинство попыток было безрезультатно, как и его планетная система из пяти правильных многогранников, другие же носили мистический характер. К счастью, связь между радиусами и периодами обращения дейст-

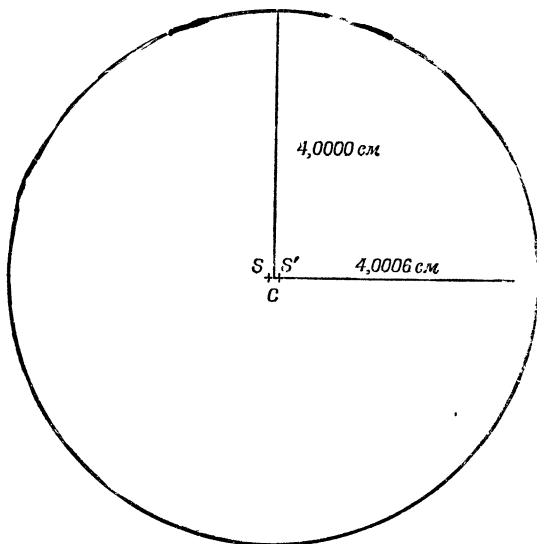
¹⁾ Может показаться странным, что Кеплер не подумал об эллипсе ранее. Это был хорошо известный овал, исследованный греками как одно из сечений конуса. Нам-то это кажется теперь очевидным, когда мы знаем ответ. Следует еще помнить, что эллипсы не имели тогда столь большого значения и именно Кеплер создал им славу. [Эллипс легко нарисовать с помощью веревки или нитки и двух гвоздиков с широкими шляпками (фиг. 83). Если вы никогда не пробовали начертить таким образом эллипс, сделайте это. Забавный эксперимент продемонстрирует вам свойства эллипса.]

Фиг. 83. Построение эллипса с помощью веревки и двух гвоздей.



²⁾ Предполагая, что орбиты планет представляют собой круги, Коперник произвел грубые оценки их радиусов, Тихо Браге дал несколько более точные оценки. Эти значения были известны Кеплеру, когда он пытался построить свою странную схему из правильных многогранников, и их неточность позволила ему считать, что они, по-видимому, подтверждают его теорию.

вительно существует, и Кеплеру посчастливилось испытать радость открытия. Он нашел, что отношение R^3/T^2 одинаково для всех планет (здесь R — средний радиус орбиты планеты, а T — период ее обращения, см. таблицу)



Фиг. 84. Орбита Земли (изображена в соответствующем масштабе).

Эксцентриситет орбит планет нашей системы в действительности очень мал. Орбиты почти круговые, однако на основе наблюдений Тихо Браге Кеплеру удалось показать, что они представляют собой не круги, а эллипсы. Показана орбита Земли в масштабе. Минимальный радиус орбиты обозначен здесь как 4,0000 см, максимальный — 4,0006 см. Эксцентриситет орбиты Марса превышает эксцентриситет орбиты Земли*более чем в тридцать раз, но и в этом случае радиусы относятся как 1,0043 к 1,000. Меркурий — единственная планета с значительно большим эксцентриситетом, ее максимальный радиус относится к минимальному как 1,022 к 1,000. Даже этот эксцентриситет орбиты представляется малым, однако это значение оказывается уже достаточным, чтобы скорость Меркурия при его движении по орбите изменялась согласно предсказаниям релятивистской механики, действительно, орбита Меркурия должна прецессировать, т. е. должна (очень медленно) вращаться. Прецессия орбиты Меркурия равна всего $1/80^\circ$ в течение столетия — она была найдена и измерена задолго до того, как появилась теория относительности и было сделано это предсказание!

Кеплер вновь был счастлив. Ему удалось вырвать у природы ее дивную гайну. Вот что он писал по этому поводу:

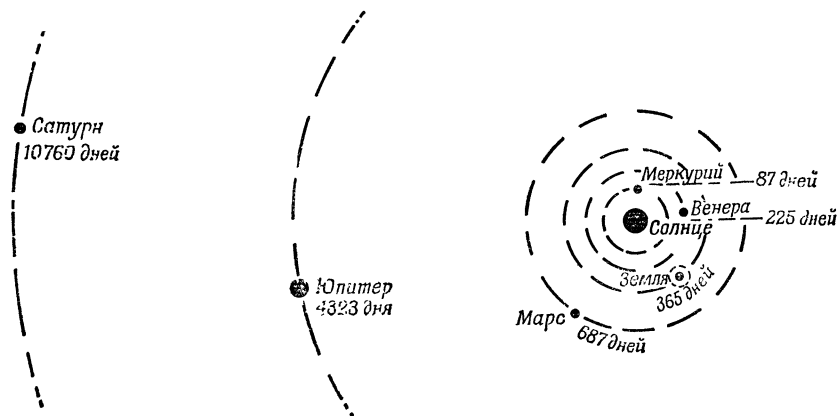
«То, что я предсказывал двадцать два года назад, то, во что я твердо верил задолго до того, как увидел «гармонии» Птолемея, то, что обещал моим друзьям в заглавии этой книги, в заглавии, которое я ей дал прежде, чем уверился в моем открытии, то, что я уже пытался искать шестнадцать лет назад и ради чего присоеди-

Данные о движении планет
Проверка третьего закона Кеплера
 Приведены современные данные, более точные, чем данные Кеплера.

Пл а н е т а	Радиус R орбиты планеты, мили	Период обращения T , дни	R^3 , (мили) ³	T^2 , (дни) ²	R^3/T^2 , (мили) ³ /(дни) ²
Меркурий	$3,596 \cdot 10^7$	87,97	$46,50 \cdot 10^{21}$	7739,0	$6,009 \cdot 10^{18}$
Венера	$6,720 \cdot 10^7$	224,7	$303,5 \cdot 10^{21}$	50490,0	$6,011 \cdot 10^{18}$
Земля	$9,290 \cdot 10^7$	365,3	$801,8 \cdot 10^{21}$	133400,0	$6,010 \cdot 10^{18}$
Марс	$14,16 \cdot 10^7$	687,0	$2839,0 \cdot 10^{21}$	472100,0	$6,015 \cdot 10^{18}$
Юпитер	$48,33 \cdot 10^7$	4323,0	$112900,0 \cdot 10^{21}$	18770000,0	$6,015 \cdot 10^{18}$
Сатурн	$88,61 \cdot 10^7$	10760,0	$695700,0 \cdot 10^{21}$	115800000,0	$6,008 \cdot 10^{18}$

В последнем столбце приводится проверка закона Кеплера.

нился к Тихо Браге и пересехал в Прагу, то, во имя чего я посвя-
 тил лучшие годы моей жизни астрономическим наблюдениям,—
 мне наконец удалось понять и объяснить, и успех мой превзошел

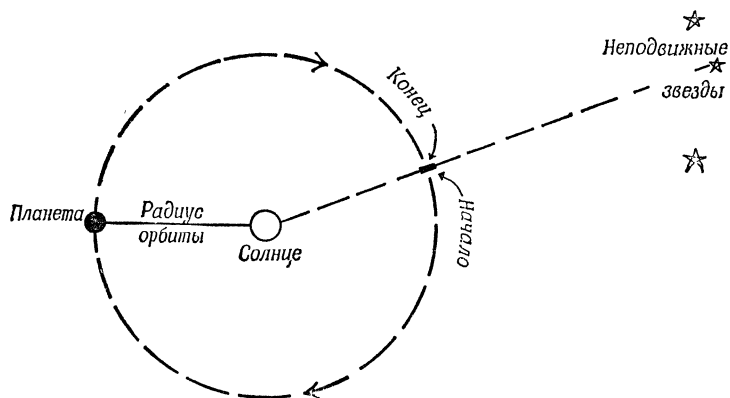


Фиг. 85, Соотношение между радиусом и «периодом обращения» для орбит различных планет.

Орбиты даны в грубом соответствии с масштабом.

даже самые оптимистические ожидания. Не прошло еще и восем-
 надцати месяцев с тех пор, как я заметил, наконец, первый проб-
 леск света. Минуло всего три месяца с тех пор, как забрезжил

рассвет, и несколько дней, как засверкало ничем не затуманенное восхитительное Солнце. Ничто не удерживает меня... жребий брошен, написана книга, которая будет прочитана либо теперь, либо



Фиг. 86. Период обращения планеты.

Это время, за которое планета совершает полный оборот по своей орбите. Определяя истинный период обращения планеты из наблюдений, следует учитывать движение Земли.

потомкам. Это меня не беспокоит; она может ждать своего читателя хоть целое столетие — ведь бог ждал шесть тысяч лет, чтобы увидели его творение».

Законы Кеплера

Потребовались годы вычислений, измерения, размышления и снова вычисления, пока Кеплер не обнаружил среди прочих бесценных для него «гармоний» три великих закона:

- ПЕРВЫЙ ЗАКОН. *Каждая планета движется по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце.*
- ВТОРОЙ ЗАКОН. *Радиус-вектор (линия, соединяющая Солнце и планету) описывает за равные промежутки времени равные площади.*
- ТРЕТИЙ ЗАКОН. *Квадраты периодов обращения планет пропорциональны кубам их средних расстояний от Солнца. (Или отношение R^3/T^2 одинаково для всех планет.)*

Первые два закона можно было проверить с помощью имеющихся данных. Таким образом, Кеплер был уверен, что его догадка правильна. Для проверки третьего закона нужны были лишь относительные значения радиусов орбит планет.

Значение трудов Кеплера огромно. Он открыл законы, которые затем Ньютон связал с законом всемирного тяготения. Конечно, сам Кеплер не отдавал себе отчета в том, к чему приведут его открытия. «Он не занимался утомительными поисками эмпирических правил, которые в будущем должен был привести к рациональному виду Ньютон. Он искал первопричины, математические гармонии, возникавшие у творца при сотворении мира»¹⁾. Кеплер не мог объяснить, чем обусловлено существование эллиптических орбит, но восхищался тем, что они существуют.

Вывод третьего закона

Вывод третьего закона сводился к угадыванию числового соотношения, которое было бы справедливо для нескольких пар чисел. Пытаясь удовлетворить определенному количеству данных (в рассматриваемом случае значениям T и R для шести планет), можно сделать много неудачных попыток, и из подобных попыток, удовлетворяющих T и R для шести планет, многие оказываются неверными в применении к седьмой планете (Урану, открытому позже). В свою очередь, успешные попытки для семи планет неверны для восьмой планеты (Нептуна). Привлечение все большего числа данных может устранить «неверные» попытки и оставить лишь «правильную». Но в каком смысле эта догадка «правильная»? Некоторые верят, что в основе вещей, которые мы наблюдаем в природе, лежит некая абсолютная истина. Кеплер и Ньютон, вероятно, думали так же. Другие считают, что верное правило это просто:

а) *то, что имеет наиболее общее применение* (например, для наибольшего числа планет).

В этом смысле предположение Кеплера о том, что отношение R^3/T^2 постоянно для всех планет, правильно, так как оно справедливо и для других планет, которые были открыты позднее, и для других систем, например для спутников Юпитера. Его правило пяти правильных многогранников было неверно, так как не соответствовало данным для шести известных планет, и оказывалось совершенно несостоятельным для случая более шести планет. Утверждают также, что верен закон, который

¹⁾ William D a m p i e r , A History of Science, Cambridge, 1949.

б) наилучшим образом соответствует теории, связывающей воедино огромное многообразие наших знаний о природе.

Если эта теория была создана только для решения какой-либо частной задачи, как рабочая гипотеза, то закон (б) становится бессмыслицей — в этом случае он лишь означает, что данный закон верен только потому, что согласуется с теорией, специально созданной в предположении, что этот закон верен. Мы называем такую теорию теорией «ad hoc». Если же, однако, теория связывает данную проблему с другой областью науки, то закон (б) служит ей убедительной рекомендацией.

Ньютон, строя догадки о существовании всемирного тяготения, создал теорию, связывающую падение тел, движение Луны и движение планет с приливами и отливами и т. д. Он показал, что третий закон Кеплера (как и другие два его закона) с необходимостью следуют из этой теории. Таким образом, закон R^3/T^2 можно считать «верным» согласно обоим определениям: и по *общей применимости*, и по *согласию с теорией*. Он мог оказаться «неверной» догадкой, ожидающей, подобно закону «пяти правильных многогранников», большего количества данных, чтобы быть опровергнутым, или теории, которая не могла бы его «предсказать»¹⁾.

Воображаемая «Задача Кеплера»

Чтобы судить о том, сколь сложно исследование, подобное тому, которое выполнил Кеплер, попробуем решить аналогичную задачу, пользуясь воображаемыми данными и воображаемыми соотношениями. Предположим, что вы придумали некую задачу и вам известна схема, по которой вы ее составили. Предложите мне найти эту схему. Вы предоставляете в мое распоряжение следующие данные:

Данные			Задача
«Планета»	R	T	Найти закон, связывающий R и T
A	1	3	
B	2	6	
C	4	18	

Вы знаете схему, так как сами ее придумали. (Эта система не подчиняется закону обратной пропорциональности квадрату расстояния: «планеты» не реальные!) Действительно, вы получите T в соответствии с *выбранным* соотношением: $T = R^2 + 2$. Таким образом, если будет открыта новая планета D с $R=5$, то для нее T будет равно $5^2 + 2$, т. е. 27. Предположим, что

¹⁾ Ученые пользуются в этом случае словом «предсказать», хотя этот термин нельзя считать удачным. Здесь он означает «привести в соответствие с другими областями науки».

вы сообщили мне данные для планет A , B и C (а данные для D попридержали). В поисках закона я пытаюсь найти такую алгебраическую комбинацию T и R , которая была бы одинаковой для каждой из этих планет. Начиная с планет A и B , я замечаю, что $T/R=3/1$ для A и $6/2$ для B , т. е. в обоих случаях это отношение одинаково. Надеюсь, что нашел правильный закон, т. е. что T/R для всех планет одно и то же, я нахожу это отношение для планеты C . В этом случае оно равно $18/4$, т. е. не равно первым двум. Поэтому я должен отвергнуть первую догадку. Пробуя другие комбинации, я нахожу еще несколько таких, которые дают одинаковые отношения для A и B , но не годятся для планеты C . Наконец, я нахожу, что соотношение между T и R будет одинаково для планет A и B , если я разделю 8 на R , прибавлю R , умноженное на 7 , и вычту T , т. е. нахожу комбинацию $8/R+7R-T$.

Для планеты A получим: $8/1+7 \times 1-3=12$.

Для планеты B получим: $8/2+7 \times 2-6=12$.

Для планеты C получим: $8/4+7 \times 4-18=12$, т. е. то же самое.

Итак, по-видимому, я нашел общий закон, которому подчиняются планеты A , B и C . Считая, что этот закон справедлив, я намереваюсь его опубликовать, но тут вы сообщаете данные о планете D : $R=5$ и $T=27$. Применяя свое правило к планете D , я получаю: $8/5+7 \times 5-27=9,6$.

Выяснив, что ваши данные не могут содержать ошибки, достаточно большой, чтобы объяснить расхождение между значениями $9,6$ и $12,0$, я начинаю все сначала. Если я достаточно терпелив и мне сопутствует удача, я могу прийти к следующей схеме: прибавить 2 к R^2 и разделить полученный результат на T . Тогда для всех четырех планет A , B , C и D получится один и тот же ответ, равный $1,000^{1)}$. Это позволяет думать, что найден правильный закон. Дальнейшие проверки при наличии большего числа данных подтверждают его правильность, и если этот закон будет находиться в соответствии с некой общей теорией, то я могу считать, что моя задача решена. Приведем таблицу, иллюстрирующую ход решения задачи.

«Планета»	Данные		Попытки получить правильное решение		
	R	T	первая попытка	N -я попытка	Q -я попытка
			$\frac{T}{R}$	$\frac{8}{R} + 7R - T$	$\frac{R^2 + 2}{T}$
A	1	3	3	12	1
B	2	6	3	12	1
C	4	18	4,5	12	1
D	5	27	5,4	9,6	1
e	3	11	3,667	12,67	1

¹⁾ Можно разделить R^2 не на T , а на $5T$, тогда получим всюду $0,200$, но в основном это дела не изменит.

В последний момент была открыта еще одна «планета», e , таких малых размеров, что ее раньше не замечали. Ее данные тоже удовлетворяют окончательному правилу (в нашем примере в этом нет ничего удивительного, так как мы сами подогнали ее данные, заранее зная, какому правилу они должны удовлетворять) и находятся в противоречии с первыми попытками. Заметим, однако, что они почти точно соответствуют второй попытке, приводя к результату, равному 12,67. Если бы данные для планеты e были известны, когда я работал над своим вторым правилом, я мог бы поддаться искушению и решить, что 12,67 — значение, достаточно близкое к 12,00, и объяснить различие этих двух значений ошибкой эксперимента.

Труды Кеплера

Кеплер написал много книг и писем, в которых подробно излагал свои открытия, описывая не только достижения, но и неудачи. Описание открытых им законов перемешано с описанием других, порой мистических идей и открытий: тут и гармония планет, гипотеза о магнитном влиянии, намеки на гравитацию, и непрерывное восхищение своей первоначальной схемой планет на основе пяти правильных многогранников. Не забудьте, что Кеплер не знал, каким должен быть «правильный ответ» на поставленные им перед собой задачи. Он не имел представления о том, какая из его теорий получит подтверждение в дальнейшем. В конце концов ему удалось напечатать «Рудольфовы таблицы», частично оплатив самому расходы по их изданию, что для него было более чем затруднительно, и таким образом появились на свет надежные астрономические данные. Он написал хорошую популярную книгу по общей астрономии, в которой изложил и объяснил теорию Коперника и описал свои собственные открытия. Книга была немедленно запрещена церковью, и это совсем разорило его, так как после этого Кеплеру почти не удавалось печатать и продавать свои книги.

«Стремясь к открытию некоего общего принципа..., Кеплер никогда не терял из виду предмет своего исследования», — пишет Д. Брюстер в своей книге «Мученики науки»¹. Воображение влекло его к созданию самых различных гипотез. Наиболее правдоподобные или, может быть, особенно ласкающие воображение подвергались самому строгому анализу; и если они оказывались несовместимыми с результатами наблюдений и экспериментов, он

¹ David Brewster, *Martyrs of Science*, 1848.

немедленно отбрасывал их как несостоятельные; столь же строгой проверке подвергалась следующая гипотеза... Этот метод позволил ему преуспеть в самых трудных исследованиях и открыть те прекрасные и глубокие законы, которые стали впоследствии предметом восхищения.

В введении к книге о жизни Кеплера, выпущенной к 300-летию юбилею ученого, Артур Эддингтон пишет:

«Я считаю, что не будет преувеличением рассматривать Кеплера как предшественника современного физика-теоретика, который пытается упорядочить теорию атома, подобно тому, как Кеплер упорядочил Солнечную систему. И дело не только в сходстве предмета исследования, но и в сходстве точек зрения. Мы способны забыть, что при открытии законов Солнечной системы, как и законов, лежащих в основе строения атома, существенным шагом явился отказ от механических моделей. Кеплер не ограничился размышлением о том, какие причины заставляют планеты двигаться в небе — система окружностей Птолемея или вихревые движения в более поздних гипотезах. А большинство из нас, вероятно, стало бы пытаться решить эту задачу так: мы выбрали бы некий конкретный механизм и с его помощью получили бы наблюдаемое движение, стремясь объяснить это движение и найти управляющие им законы. Кеплером же руководило чувство математической формы, эстетическое чутье, подсказывающее ему, какими должны быть те или иные соотношения. Теперь нам уже не кажется столь нелепым, что характер движения планеты должен вытекать из условия постоянства воздействия, а не из знания того, что же ее конкретно подталкивает. Кеплера также привлекала идея, согласно которой планета должна двигаться так, чтобы соблюдалось равенство площадей, описываемых за одно и то же время радиусом-вектором, — предположение, которое люди, мыслящие ортодоксально, отвергли бы как фантастическое. Интересно, как был принят современниками Кеплера подобный отказ от механических концепций? Нашлись ли среди них те, у кого подобный авантюризм научного мышления вызывал недовольство и которые не могли согласиться с новыми законами, не получив какого-либо объяснения или модели, демонстрирующей механизм действия этого закона? На смену Кеплеру пришел Ньютон, и тенденция выявлять механизмы постепенно опять стала играть доминирующую роль. И лишь в последние годы мы стали возвращаться к точке зрения, несколько схожей с точкой зрения Кеплера, и гармония сфер перестает тонуть в грохоте машин.»

Задача 1

- а) К чему относится открытие Кеплера о соотношении «пяти правильных многогранников»?
- б) Дайте краткое описание этой схемы.

Задача 2. Законы Кеплера

- а) Дайте краткие описания (с чертежами) первого, второго и третьего законов (основных законов, а не его схемы «правильных многогранников», так называемого «нулевого закона», или «Закона 0»).
- б) Кеплер сам верил в существование чего-то, что поддерживает движение планет, и предполагал наличие своего рода рычага, идущего от Солнца к планете. Будет ли такой рычаг вращаться с постоянной скоростью? Если нет, то на какой стадии планетного года он должен вращаться наиболее быстро?

Задача 3. Задачи для современного Кеплера

Радиоактивные атомы испускают маленькие атомные «снаряды», которые представляют собой частицы, входящие в состав атомного ядра. Многие атомы, включая радий, испускают частицу, которая представляет собой электрически заряженный атом гелия (ядро гелия, или атом гелия, лишенный двух своих электронов). Это так называемые альфа-частицы (α -частицы). Атомный «взрыв», в процессе которого радиоактивный атом испускает α -частицу, происходит самопроизвольно, причем первоначальный атом превращается в атом совершенно иного рода, с другими химическими свойствами. Радиоактивные изменения дают нам информацию о структуре атомных ядер. Кроме того, они снабжают нас «снарядами», с помощью которых можно исследовать структуру других атомов, подобно тому как боксер «исследует» физиономию других боксеров. В частности, поток α -частиц применялся для исследования структуры атомов золота в знаменитом эксперименте, следствием которого явился коренной пересмотр атомной теории. Приведенная ниже задача относится к этому эксперименту.

Поток α -частиц направляется на очень тонкую золотую фольгу в вакууме. Большинство α -частиц проходит через фольгу, не испытав сильных столкновений с атомами золота, но некоторые α -частицы в результате столкновений изменяют свои направления. Очень небольшое число их даже возвращается назад. Эти наблюдения послужили основой новой теории, которая затем предсказала, сколько α -частиц из миллиона должно возвращаться в заданном направлении. Из теории следует, что должно иметь место определенное соотношение между числом вылетающих обратно α -частиц (на миллион) и скоростью, которую они имеют при падении на золотую фольгу. Эта теория была проверена экспериментально.

Ниже в таблице приведены некоторые данные этих измерений.

С помощью этих данных можно решить задачу, аналогичную той, которая стояла перед Кеплером, когда он уже располагал данными об орбитах планет, но еще не вывел третьего закона. Между N и v существует простая зависимость.

Можете ли вы определить эту зависимость? Попытайтесь сделать это самостоятельно, не прибегая к помощи книг. Если вы найдете искомое соотношение, покажите, насколько близко оно соответствует приведенным данным. Конечно, те экспериментаторы, которые проводили этот опыт, имели по

Скорость атомов гелия v (в произвольных единицах)	Число атомов гелия N , возвраща- ющихся назад в единицу времени в заданном направлении
2,00	25
1,91	29
1,70	44
1,53	81
1,39	101
1,13	255

Скорости даны в произвольных единицах. Одна такая единица соответствует примерно 10 000 000 м/сек.

сравнению с вами то преимущество, что знали, какое соотношение надо испытывать прежде всего, но они должны были проделать сложный эксперимент. Нельзя ожидать, что в этих экспериментах, где приходится вести счет отдельным атомам, можно получить очень точные результаты; поэтому, в противоположность результатам Кеплера, ваши постоянная может колебаться в пределах 10%.

«Наука спустилась с небес на Землю по наклонной плоскости Галилея».

В то время, когда Тихо Браге переехал в Прагу с частью спасенных им приборов, а Кеплер начал наступление на Марс, Галилею — современнику Кеплера — было за тридцать и он имел уже некоторую известность как математик и физик. За свою жизнь Галилей совершил ряд великих открытий и величайшее из них, пожалуй, — введение в качестве основы научного познания описания данного эксперимента на языке математики. Галилей упорно ставил опыты сам и использовал чужие эксперименты, пока не добивался правильного решения проблемы; но прежде всего он был великим мыслителем и учителем и обладал столь блестящим полемическим талантом, что мог выбить почву из-под ног у философов, воспитанных на старых традициях, пользуясь их же собственными аргументами. Он любил пользоваться тем, что мы называем «мысленными» экспериментами, т. е. воображаемыми экспериментами, которые служат проверке той или иной гипотезы¹⁾. В этих мысленных экспериментах Галилей опирался на представления о природе явлений, основанные на здравом смысле, или иногда обращался к действительным экспериментам, а затем предсказывал, какими должны быть те или иные факты или соотношения. Его справедливо можно считать не только отцом экспериментальной физики, как это давно вошло в традицию, но и первым современным физиком-теоретиком.

Галилей собрал и систематизировал те факты и идеи, из которых много лет спустя Ньютон вывел законы движения. Он заимствовал многочисленные данные, полученные до него экспериментаторами и мыслителями; известны даже издания этих авторов, которые были им использованы в книгах. Он не был открывателем

¹⁾ Например, доказательство, которое Галилей приводил при рассмотрении падения трех камней (см. гл. 1 «Земное тяготение», входит в т. 1 настоящего издания), или доказательство, приводимое им при рассмотрении силы, действующей при разрыве проволок (см. гл. 5 «Связь между напряжением и деформацией», т. 1).

новой механики, однако создал стройную логичную систему механики, сделал ее убедительной и превратил во всеобщее достояние. Сконструировав телескоп, он с его помощью получил новые данные, подтверждающие теорию Коперника и третий закон Кеплера. Галилей излагал и разъяснял теорию Коперника с поразительной четкостью и ясностью, опровергая тем самым установившиеся с давних пор традиции и ниспровергая признанные авторитеты. Он так страстно призывал к правдивым экспериментам и к их разумной интерпретации, что вдохнул в физику новую жизнь.

Галилей и новая наука

Наиболее значительным вкладом Галилея в новую науку явилось изменение методов обработки экспериментальных результатов. Он обратился вновь к методам Пифагора и Архимеда: *знания, полученные экспериментальным путем, должны были приводиться в систему с помощью абстрактных математических представлений*. Так, он с определенностью установил, что свободно падающий предмет проходит за промежутки времени, равные 1, 2, 3, 4, ... (отсчитываемые от того момента, когда предмет находится в покое), расстояния, пропорциональные $1 : 4 : 9 : 16$ (т. е. что существует соотношение, которое мы сейчас выражаем с помощью алгебры в следующей компактной форме: $s \sim t^2$). При выводе этого соотношения он не учитывал такие факторы, как сопротивление воздуха, вращение, движение в горизонтальном направлении, и описал идеальный случай падения тела в пустоте. С помощью простых математических рассуждений он вывел следующую форму этого закона: расстояния, проходимые телом за последовательные равные промежутки времени, увеличиваются в пропорции $1 : 2 : 3 : 4 \dots$, или, как мы говорим теперь, Δs (при $\Delta t = 1$) $\sim t^1$. Галилей и его преемники не грешили против истины из-за того, что не учитывали при рассмотрении тех или иных задач такие реальные факторы, как сопротивление воздуха. Современный ученый может сформулировать идеальные законы механики для материалов, не испытывающих трения, тележек, не имеющих веса, нерастяжимых проволок, ..., а затем добавить реальные условия и видоизменить эти законы.

¹⁾ Это более простое правило Галилея из задачи 2 гл. 1 («Земное тяготение», т. 1, стр. 42). Если $\Delta t = 1$, то Δs — скорость, и эта последовательность значений Δs означает постоянство ускорения — скорость непрерывно увеличивается со временем.

Галилей содействовал также полному изменению взглядов в области астрономии: он устранил резкое различие между небесными и земными явлениями. Коперник придерживался мистического представления об идеальных сферах, а Галилей пытался рассматривать планеты, Солнце и Луну как обычные земные тела. Он пользовался одним и тем же методом, решая задачу о шаре, катящемся вниз с холма, и о планете, движущейся в небе. Он не довел до конца это рассмотрение, так как все еще считал, что планеты движутся по естественным круговым орбитам, однако благодаря ему человек стал использовать общие математические законы для описания всей Вселенной.

Галилей применял математические методы к величинам, которые можно было непосредственно измерить. Он придавал большое значение таким «первичным» качествам материи, как длина, объем, скорость, сила; он отвергал как нечто, выходящее за пределы настоящей науки, такие субъективные понятия, как цвет, вкус, запах, музыкальный слух, которые, по его словам, исчезают, когда отсутствует наблюдатель¹⁾.

Вспомним строки Шекспира:

Крик ворона и жаворонка пенье
Равны, коль им внимают равнодушно...²⁾

Так Галилей строил науку на трезвых математических рассуждениях и методах; впоследствии так поступал и Ньютон. Кроме того, Галилей ввел коренные изменения в философию — установил четкое разграничение материи и сознания. Продолжателем Галилея в этом направлении явился Декарт. Учение Галилея способствовало возникновению точки зрения на материю и движение как на нечто истинное и реальное, тогда как вкус, цвет и т. п. представлялись лишь ощущениями, вызываемыми в сознании наблюдателя формами или движениями атомов, хотя сами атомы точно следуют математическим законам. Столетием позже Беркли предположил, что даже первичные свойства материи субъективны; они воспринимаются нашим разумом как «ощущения». С этой точки зрения вся система научных законов и знаний, которую строил Галилей, — абстрактная картина, которую мы получаем на основе нашего субъективного восприятия внешнего мира.

¹⁾ Такие исключения могут быть отвергнуты при появлении соответствующих методов измерения. Например, изобретение термометра с определенной шкалой превратило наше субъективное представление о теплоте в целую область науки.

²⁾ «Венецианский купец», перевод Т. Л. Щепкиной-Куперник.

Это хорошая картина, удобная, полезная, интересная, но это не тот мир, в котором мы существуем. Мир, каким бы реальным и конкретным он ни был вне наших ощущений, может быть значительно более сложным, чем нам удастся «узнать», пользуясь доступными научными методами исследования. Если мы верим в то, что полученное нами с помощью этих методов представление о мире вполне реально и истинно, то можем найти законы механики, позволяющие проследить движение каждого атома от настоящего момента до далекого будущего и предсказать таким образом все события, включая наши собственные решения и поступки. Это лишило бы нас всякой свободы действия и всякой возможности выбора — очень печальная перспектива. Эти рассуждения применимы, однако, лишь к абстрактному миру ньютоновской науки, а не к тому сложному конкретному миру, который реально существует.

Жизнь и деятельность Галилея. Пиза

Галилей был сыном итальянского дворянина — философа и музыканта. Семья жила в Пизе, вблизи Флоренции. Молодой Галилей мечтал стать художником, но отец послал его в университет изучать медицину, чтобы он приобрел профессию, по тем временам весьма уважаемую и хорошо оплачиваемую. В университете Галилей воспользовался возможностью изучить геометрию. (Существует версия, будто Галилей, потрясенный тем, что открылось ему на лекции об Евклиде, умолял профессора математики взять его к себе в ученики.) Отец Галилея возражал против этого нового увлечения сына — в то время математики получали ничтожно малое вознаграждение за свой труд. Однако это не уменьшило энтузиазма Галилея. Он с увлечением читал сочинения Евклида и Архимеда и вскоре начал исследование свойств центра тяжести.

Когда Галилею минуло двадцать пять лет, герцог, один из членов правящей семьи Медичи, назначил его на должность преподавателя математики. Оплата была мизерной. С огромной энергией и энтузиазмом Галилей начал заниматься механикой движущихся тел, он увлеченно читал старинные книги, отделяя то, что представлялось разумным, от чепухи и проверяя утверждения и идеи с помощью эксперимента. Он с особым наслаждением раздражал последователей учения Аристотеля, доказывая им ошибочность той, то другой их точки зрения. И хотя Галилей был прав, его запальчивость вряд ли была разумной.

«Обнаружение ошибок в устоявшихся взглядах вопреки трезвому рассудку может вдохновить и воодушевить молодого ученого. Чувство победы над противником способно повлечь резкости в выражениях, заставить смотреть на приверженца ошибочных мнений, как на врага науки. Подобно солдату, впервые обagrившему кровью врага свое копьё, ученый способен запятнать свои первые достижения жестокостью... Галилей, по-видимому, вел неприимимую войну с последователями Аристотеля; и раздражение, которое возбуждали его многократные и успешные атаки, было столь велико, что до конца дней его преследовали со злобой, которую редко возбуждает простое различие во мнениях»¹⁾.

Рассуждения Галилея о падении тел и ускоренном движении опрокинули существовавшие до того взгляды и, подобно доказательствам ложности старых доктрин, были встречены враждебно. Вокруг Галилея собирались восторженные поклонники, но одновременно росло и число врагов. Их злоба и зависть создали невыносимую обстановку в Пизе, и Галилей принял приглашение в Университет в Падуе, соседней республики Венеция. В Падуе он встретил философов, которые уже открыто говорили о том, что свободное падение тел должно происходить под действием некой силы, и сомневались в справедливости взглядов, полагавшихся на «естественное место вещей» или искавших «первопричину». Таким образом, в Падуе уже была подготовлена почва для учения Галилея. Он читал свои лекции страстно и с поразительным мастерством, писал сочинения о движении, механике, астрономии. Но и здесь он получал столь скудное содержание, что вынужден был сдавать комнаты студентам и организовать мастерскую, в которой изготовлялись на продажу различные приборы²⁾.

Падуа

На новом посту в Падуе Галилей стал приобретать все большую известность. Он любил спорить, разяснять и доказывать свою правоту. Никто не мог превзойти его в научных дискуссиях: он начинал с того, что излагал точку зрения своих противников более ясно, чем то могли сделать они сами, а затем разносил ее в пух и прах — в этом отношении он был истинным виртуозом.

¹⁾ David Brewster, *Martyrs of Science*, 1848.

²⁾ Галилей изобрел «военный компас» — комбинацию транспортира и скользящей линейки, и получал на него заказы из многих стран Европы. Эти приборы он посылал в качестве подарков различным влиятельным лицам, чтобы доказать, что может быть полезен «военному искусству».

В Падуге он пробыл двадцать лет и сделал очень много в области механики, многократно выступал он и с доказательствами правильности астрономии Коперника. Лекции собирали огромные аудитории; чтобы учиться у Галилея, в Падугу приезжали многие высокопоставленные лица.

Когда на небе внезапно зажглась новая яркая звезда, Галилей прочел на эту тему три лекции. Его приходили слушать толпы народа, которых он упрекал за то, что внимание их привлекло случайное явление, тогда как кругом ежедневно происходят чудеса природы, которых они не замечают. Лекции Галилея приобрели такую популярность, что огромный зал Школы медицины порой не мог вместить всех желающих и Галилею приходилось выступать под открытым небом. С неотразимой силой и убедительностью проповедовал он новую науку.

Астрономия Коперника

В начале своей деятельности Галилей распространял идеи Коперника и доказывал его правоту спокойно, затем все более горячо и неосторожно. В своем «Диалоге» он, говоря от лица одного из собеседников, описывает, как сам пришел к убеждению в правильности теории Коперника:

«По этому случаю мне хочется рассказать вам некоторые происшествия, случившиеся со мной вскоре после того, как я впервые услышал разговоры об этом учении [системе Коперника]. Когда я был еще совсем юным и только что окончил курс философии, ... случилось, что некий... последователь Коперника приехал в наши края и прочел в одной академии две или три лекции на эту тему при большом стечении слушателей, вызванном, думается, более новизной предмета, нежели чем-либо другим. Я туда не пошел в твердом убеждении, что подобное мнение может быть только отменной глупостью. Когда я затем расспрашивал некоторых из присутствовавших на лекции, то услышал лишь сплошные издевательства, и только один человек сказал, что предмет этот не включает в себе ничего смешного. Так как я почитал его за человека умного и очень рассудительного, то мне стало очень жаль, что я не пошел на лекцию, и с этого времени, встречая каждый раз сторонника мнений Коперника, я выпрашивал его, всегда ли он придерживался такого воззрения, и сколько я ни предлагал этот вопрос, я не нашел ни одного, кто бы не сказал мне, что он долгое время придерживался противоположного мнения и перешел к теперешнему под влиянием

силы доводов, его убедивших. Испытывая их затем одного за другим, чтобы посмотреть, насколько хорошо они знакомы с доводами противной стороны, я убедился, что они владеют ими в совершенстве, так что поистине я не мог сказать, что они примкнули к этому мнению по невежеству, легкомыслию или, так сказать, умничая. Наоборот, скольких перипатетиков¹⁾ и сторонников Птолемея я ни спрашивал, изучили ли они книгу Коперника (а из любопытства я спрашивал об этом многих), я нашел лишь весьма немногих, поверхностно знакомых с ней, и, думаю, ни одного, кто бы понял ее как следует. И от последователей учения перипатетиков я также старался узнать, придерживался ли кто-нибудь из них когда-либо иного мнения, и равным образом, не нашел ни одного такого. Вот почему, принимая во внимание, что среди приверженцев мнения Коперника нет никого, кто раньше не придерживался бы мнения противоположного и кто не был бы отлично осведомлен о доводах Аристотеля и Птолемея, и что, наоборот, среди последователей Птолемея и Аристотеля нет никого, кто придерживался бы ранее мнения Коперника и оставил его, чтобы перейти на сторону Аристотеля, принимая, говорю я, это во внимание, я начал думать, что тот, кто оставляет мнение, впитанное с молоком матери и разделяемое множеством людей, для того чтобы перейти к другому, отвергаемому всеми школами и разделяемому весьма немногими и кажущемуся поистине величайшим парадоксом, тот необходимо побуждается и даже принуждается к этому достаточно сильными доводами. Поэтому, мне кажется, любопытно, как говорится, испытать до дна...»²⁾.

Учение Галилея о движении

В Пизе и Падуе Галилей собрал и привел в систему свои познания и идеи в области механики, которые он значительно позже изложил в трактате «Две новые науки». Одним из первых было его открытие замечательного свойства маятников: период колебания маятника (при малых амплитудах) не зависит от амплитуды. Существует легенда, что Галилей открыл это свойство маятников еще будучи студентом в Пизе при наблюдении затухающих колебаний паникадила в соборе. Галилей не имел точных часов (ведь именно он-то и открыл принцип действия точных часов), поэтому он поль-

¹⁾ Сторонников Аристотеля.— *Прим. ред.*

²⁾ Галилео Галилей, Диалог о двух главнейших системах мира птолемеевой и коперниковой. Перевод А. И. Долгова, М.— Л., 1948.

зовался для отсчета времени собственным пульсом¹⁾. Позднее он использовал свое открытие в медицине, сконструировав регулируемый маятник для счета пульса.

На одной из ранних стадий своей деятельности Галилей исследовал движение падающих тел и пришел к выводу, что существовавшее до тех пор представление о том, будто тяжелые тела падают быстрее, чем легкие, причем их скорость *пропорциональна их весу*, неправильно. Это представление восходит к Аристотелю, который, вероятно, рассматривал конечную скорость в случае очень долгого падения, когда трение о воздух возрастало до тех пор, пока не начинало уравновешивать силу тяжести. Принимать это рассмотрение за закон падения тела из состояния покоя — бессмыслица, которую, однако, по прошествии столетий догматического учения стали считать неоспоримой. Галилей наблюдал, что тела, имеющие *разные* массы, падают с одинаковой скоростью, если не считать относительно малых отклонений, которые он объяснял сопротивлением воздуха. Он заметил, что раскатанный в тонкий листок кусок золота падает значительно медленнее, чем целый кусок. Он предложил произвести следующий решающий опыт: понаблюдать за падением кусочка свинца и клочка шерсти в пустоте, но в то время этот опыт осуществить было невозможно. Впоследствии он был сделан Ньютоном. Галилей возмущался последователями Аристотеля, утверждавшими, что за время, за которое пушечное ядро весом 100 фунтов падает на высоту 100 футов, мяч весом 1 фунт упадет всего лишь на 1 фут. Реальный эксперимент, по его словам, приводит к различию в расстоянии, равному всего лишь ширине нескольких пальцев. «Как вам удастся спрятать 99 футов за двумя пальцами?» — спрашивал Галилей, высмеивая своих противников.

Галилей доказал правильность своего предположения о том, что все тела падают с одинаковой скоростью, сравнивая колебания маятников с легким и тяжелым грузами. Оказалось, что период колебания маятника не зависит от веса груза. Движение маятника представляет собой как бы «замедленный» вариант падения, при котором можно точно измерить интервалы времени (можно измерять время нескольких колебаний и брать среднее, чтобы увеличить точность измерений); при этом трение практически

¹⁾ Эта история сомнительна, ибо паникадило, о котором идет речь, появилось в соборе на несколько лет позднее, нежели произошло само открытие. Однако Галилей писал в «Диалоге»: «...Тысячи раз я наблюдал колебания, чаще всего в церквах, где люстры, подвешенные на длинных шнурах, случайно приходили в движение».

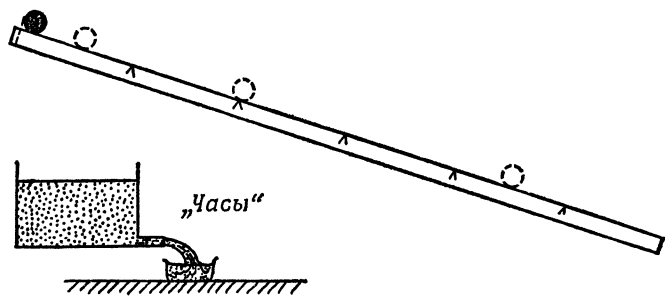
отсутствует. (Поскольку период колебаний не зависит от амплитуды, то в этом случае *трение о воздух не будет играть роли*. Трение будет уменьшать амплитуду колебаний, но это не имеет значения!) Этот результат соответствует представлениям Ньютона о массе и тяготении, которые были сформулированы и развиты им много позднее. Тяжелый предмет весит больше, чем легкий, поэтому Земля сильнее его притягивает. С этой точки зрения мы должны были бы ожидать, что тяжелый предмет будет падать быстрее. Однако он содержит большее количество *вещества* (материи) или *массы* (термин, введенный позднее Ньютоном). Тяжелый предмет имеет большую «инерцию», нежели легкий, и нуждается в большей силе для своего ускорения¹. Поэтому если эксперимент показывает, что тяжелые и легкие предметы падают с одним и тем же ускорением (или совершают одинаковые колебания вроде маятника), то это значит, что более тяжелый предмет имеет массу настолько большую, насколько больше его вес. Это замечательное свойство силы тяжести, согласно которому Земля притягивает тела с силой, пропорциональной их инертным массам. Галилей, по-видимому, принимал это положение, не доискиваясь его причины. В своих исследованиях силы и движения он не дал четкого определения массы. Это было сделано Ньютоном. В наш век, когда выяснилось, что масса связана с энергией, она приобрела новое значение.

Чтобы подробно исследовать падение тела, Галилей воспользовался наклонной плоскостью. Он описывает следующий эксперимент: шар катится по длинной, очень пологой наклонной плоскости — по доске с желобом, оклеенным гладким пергаментом (фиг. 87). Время, в течение которого шар проходил отрезок пути, измерялось с помощью простых водяных часов: экспериментатор взвешивал количество воды, вытекающее через узкое отверстие из сосуда с водой. Измерения времени и расстояния находятся в следующем соотношении:

РАССТОЯНИЕ, ПРОХОДИМОЕ ТЕЛОМ ИЗ СОСТОЯНИЯ ПОКОЯ,
ПРОПОРЦИОНАЛЬНО КВАДРАТУ ВРЕМЕНИ.

¹ Хотя представление о массе — отчасти продукт воображения, а отчасти проистекает из свойств самой природы, пояснить его в нескольких словах невозможно. Почувствовать природу массы можно только на опыте; называя ее «инерцией», мы ограничиваемся лишь простой терминологией. Когда Ньютон определил массу как «количество материи», он просто перенес неопределенность на определение материи. Однако это описание Ньютона не было таким бесполезным, каким его считают некоторые критики. Оно помогло современникам Ньютона понять, что он подразумевал под этим понятием. Может быть, оно остается полезным и для современных учащихся.

Неизвестно, действительно ли Галилей сам произвел этот опыт или просто описал опыт, произведенный еще до него. Как бы то ни было, измерения были грубые, хотя Галилей считал, что установил правильный «закон». С помощью остроумных геометрических доказательств он показал, что этому закону должно с необходимостью подчиняться движение с постоянным соотношением $\Delta v / \Delta t$.



Фиг. 87. Опыт Галилея.

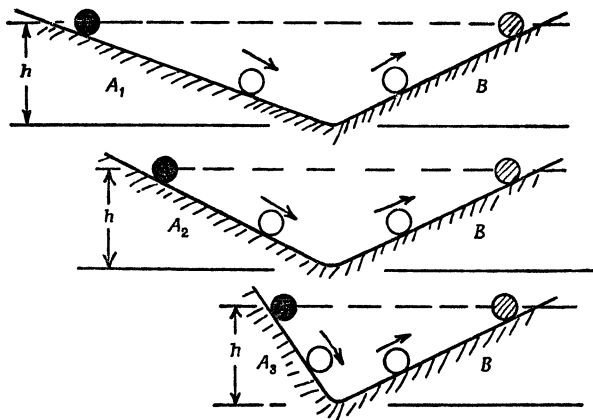
Таким образом, катящийся шар движется с постоянным ускорением. С помощью экстраполяции, переходя от малого наклона к все большему и, наконец, к падению по вертикали, Галилей доказал, что свободно падающие тела имеют постоянное ускорение; следовательно, он получил закон, которому подчиняется их падение.

На произвольной наклонной плоскости сила, вызывающая ускорение, должна быть одинакова на всем пути. (Это — постоянная составляющая *веса* шара.) Таким образом, Галилей уже получил часть *второго закона Ньютона*: *постоянная сила вызывает постоянное ускорение*.

Рассматривая холмы с различными склонами, Галилей почти вплотную подошел к главному соотношению *второго закона Ньютона*: *ускорение пропорционально силе*; но это соотношение он выражал в геометрической форме, что не позволяло выявить роль силы. Галилей разработал экспериментальные методы науки о движении, которыми можно было пользоваться при решении самых разнообразных задач: о полете снарядов, движении маятников, планет, а позднее о движении различных механизмов и даже составных частей атомов.

Скорость у подножия холма

Галилей пришел к такому выводу: если шар катится вниз с одной наклонной плоскости A , а затем вверх по другой наклонной плоскости B , то он докатится до первоначального уровня, каков бы ни был наклон. Это привело его к очень важному общему допущению, на основании которого он сделал много предсказаний. Вообразим себе несколько различных склонов A_1, A_2, A_3 одной и



Фиг. 88. Идеальный случай движения «с горки на горку».

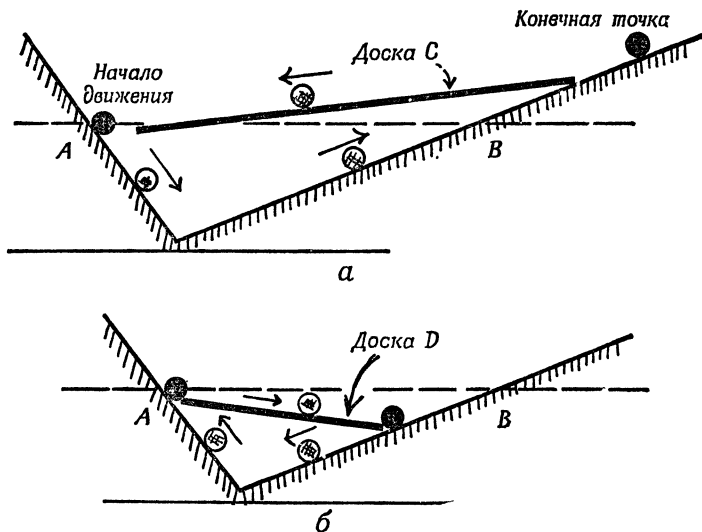
той же высоты, примыкающих к склону B (фиг. 88). Если предположение Галилея правильно, то шар должен подняться на одну и ту же высоту по склону B , независимо от того, с какого склона A он спустился. У подножия холма, перед тем, как шар начнет подниматься по склону B , он будет иметь импульс, необходимый для того, чтобы подняться на склон B до точки, соответствующей той же высоте. Этот импульс должен, следовательно, быть одним и тем же у подножия холмов A_1, A_2 и т. д., т. е. одним и тем же для всех склонов. Поэтому шар должен иметь одну и ту же скорость у подножия любого склона. Галилей сделал на основании этого общее предположение: скорости, приобретаемые телом, движущимся по плоскостям, имеющим различные наклоны, равны между собой, если равны высоты, с которых он спускается. Мы вкратце говорили об этом свойстве в гл. 7¹⁾, где указывали, что оно относится ко вто-

¹⁾ Гл. 7 «Сила и движение» входит в т. 1 настоящего издания.

рому закону Ньютона. Галилей обобщил этот вывод на случай холмов, имеющих неровные склоны. Используя приведенные рассуждения и постоянство ускорения, Галилей получил ряд геометрических следствий для движения тел по наклонной плоскости.

Правило «с горки на горку»

Успешной демонстрации опыта с шаром, скатывающимся вниз по одному склону и затем поднимающемуся вверх по другому на ту же высоту, препятствует трение. В своих рассуждениях Галилей, вероятно, исходил не только из эксперимента, но и из теоретических соображений — он обладал гениальной интуицией и благодаря ей, опираясь на самые грубые эксперименты, выдвигал правильные гипотезы. Для своих коллег Галилей подкреплял гипотезу

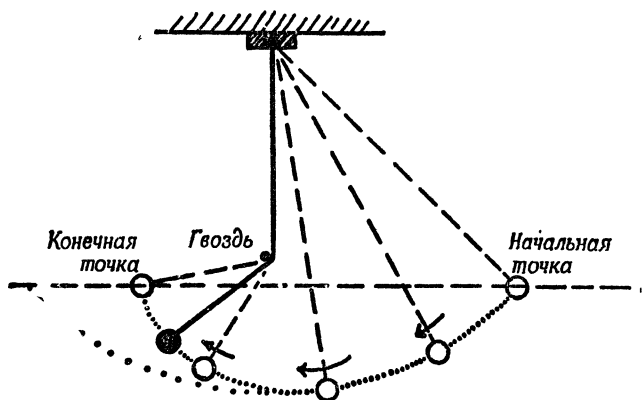


Фиг. 89. «Мысленный опыт» Галилея.

a — шар остановился выше; *b* — шар остановился ниже.

тщательными аргументами о сложных движениях вниз и вверх, так что гипотеза должна была представляться еще более правдоподобной. Рассмотрим следующий «мысленный эксперимент» Галилея (описанный позже другим автором). Предположим, что шар остановится на склоне *B* выше. Воспользуемся доской *C* (фиг. 89, *a*), заставим шар скатиться обратно к началу его движения по склону *A* и позволим ему снова скатиться со скоростью, которую он приобрел. Будем повторять этот процесс. Шар от раза к разу будет приобретать все больший и больший импульс, что является абсурдом. Если шар, поднимаясь по склону *B*, остановится ниже, мы должны будем производить отсчет от

этой точки. Если шар скатится теперь вниз по склону *B*, то следует ожидать, что он, поднимаясь затем по склону *A*, дойдет до той точки, с которой началось его движение, т. е. на этот раз остановится выше исходной точки на склоне *B*. Воспользовавшись другой вспомогательной доской *D* (фиг. 89, *б*), можно вновь и вновь продолжать этот невероятный процесс. Оба случая представляются абсурдными; шар должен подняться на ту же высоту по противоположному склону. Слабым пунктом в этих рассуждениях является требование (во втором случае), чтобы движение было в точности обратимо. Но и помимо этого такой метод решения задачи не представляется строго научным. Не следует забывать, что Галилей жил в то время, когда такого рода научные споры и



Фиг. 90. Опыт с гвоздем и маятником.

Груз маятника поднимается на одну и ту же высоту, независимо от изменения движения, вызываемого наличием гвоздя.

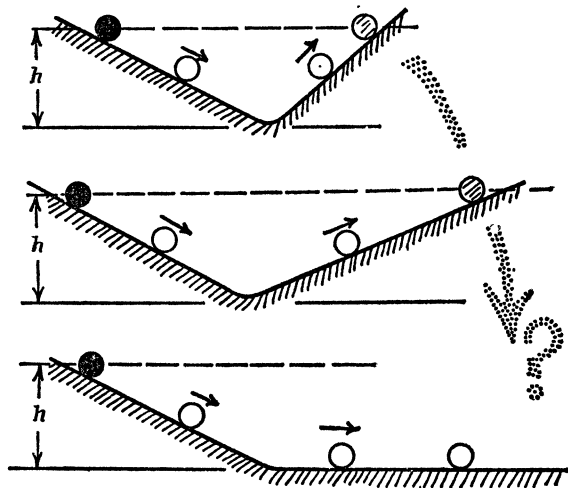
такой подход к решению различных проблем имели большое значение. Кроме того, здесь, как и в любой другой области физики, дискуссия могла помочь выяснению данной проблемы, указать путь, по которому следует вести исследование.

Сам Галилей доказал правильность своих рассуждений, выполнив то, что казалось невозможным, — осуществил удивительно простой, но убедительный вариант описанного опыта «с горки на горку», а именно опыт с гвоздем и маятником. В этом опыте гвоздь задерживает нить маятника, когда последний проходит через нижнюю точку; таким образом, маятник из длинного внезапно превращается в короткий. Во всех случаях груз маятника, падавший по длинной дуге большого радиуса, поднимается затем по дуге меньшего радиуса на ту же высоту (фиг. 90). Попробуйте сами произвести такой эксперимент.

Исследуя это явление, Галилей держал в своих руках ключ к одному из аспектов закона сохранения энергии, который в общем виде был, однако, сформулирован позже.

Первый закон движения Ньютона

Правило «с горки на горку» указывает еще на одно обстоятельство. Галилей рассмотрел предельный случай, когда второй холм горизонтален, т. е. склон отсутствует (фиг. 91). Тогда шар, скатившись с первого холма, должен продолжать свое движение по горизонтали бесконечно долго. Таким образом, Галилей открыл сущность первого закона движения Ньютона: *Если на тело не действует сила, то оно продолжает двигаться с постоянной скоростью*



Фиг. 91. Доказательство Галилея.

(по прямой). Хотя Галилей этого и не знал, в его руках был ключ к решению одной из загадок, связанных с движением планет. Какие силы поддерживают движение планет, Луны и других небесных тел? Что подталкивает их вдоль направления движения по орбитам? На этот вопрос теперь можно было бы ответить: сила не нужна, так как движение этих небесных тел продолжается само по себе.

Независимость движения

Сложение скоростей, сил и т. д. по правилу параллелограмма было только что открыто; по существу оно означало, что один вектор не оказывает влияния на другой — они действуют независимо и складываются геометрически. В своих экспериментах Галилей

настаивал на том, что движения (и силы) не зависят друг от друга. Например, ускоренное движение по вертикали и постоянное движение по горизонтали просто складываются как векторы, одно движение не влияет на другое, каждое происходит независимо. Он применил это правило к полету снарядов и показал, что их траектории являются параболами.

Галилей многократно говорил об этой независимости векторов в своих диалогах, возражая критикам теории Коперника. Последние заявляли, что если Земля движется, то падающие тела будут отставать от нее. Галилей задавал им вопрос: как ведут себя предметы, падающие с мачты корабля, который плывет с постоянной скоростью? Если его противники начинали что-то бормотать о влиянии ветра, Галилей проводил «мысленный эксперимент» в каюте корабля. Он утверждал, что воздух и облака, которые участвовали в движении поверхности Земли, просто продолжают двигаться вместе с ней и далее. Он предлагал своим читателям задачи, подобные тем, которые приводились в конце гл. 1 и 2¹⁾, и демонстрировал, что равномерное движение лаборатории не влияет на эксперименты, связанные со статикой, со свободным падением тел, с полетом снарядов. Равномерное движение лаборатории невозможно обнаружить никакими механическими опытами, проводимыми внутри нее. В этом и заключается *принцип относительности Галилея*.

Отъезд из Падуи

Галилей прожил в Падуе двадцать лет. Его стали уговаривать вернуться в родной город Пизу, в университет. Он не терял связи с семейством Медичи и теперь вел переговоры с герцогом о переходе на работу во Флоренцию, которая оплачивалась бы выше, чем его работа в Падуе, и оставляла бы больше свободного времени. Его обязанности в Падуе занимали всего лишь один час в неделю, но он вынужден был давать частные уроки, ибо получаемое жалованье было все еще слишком скудным, хотя преклонявшийся перед ним университет уже несколько раз увеличивал его содержание. «Он устал от университетов, от чтения лекций, от преподавания, от квартирующих у него студентов; ему надоели длинные мантии, которые он высмеивал в сатирических поэмах... от душной и мелочной атмосферы Падуи...

¹⁾ Гл. 1 («Земное тяготение») и гл. 2 («Полет снарядов. Геометрическое сложение: векторы») входят в т. 1 настоящего издания.

Он хотел жить на родине, дышать родным воздухом, жить свободно, среди друзей, выбранных им самим¹⁾. Ему необходимо было свободное время для исследований и изложения своих идей, нужна была поддержка влиятельных лиц. Галилей обещал герцогу, что, получая большее жалованье, он напишет ряд книг: «...две книги о системе Вселенной, обширное сочинение, включающее Философию, Астрономию и Геометрию; затем три книги о движении, три книги о статике, две о демонстрации принципов, одну о проблемах, а также книги о звуке и речи, о свете и цвете, о приливах и отливах, о составлении непрерывных величин, о движении животных и о военном искусстве»²⁾. Одно это перечисление дает некоторое представление о широте интересов Галилея и о той страстности, с которой он предавался научным исследованиям.

Телескоп

Готовясь к переезду из Падуи в Пизу и Флоренцию, Галилей случайно услышал об изобретении телескопа. Пронесся слух, будто какой-то голландец, занимающийся изготовлением очков³⁾, изобрел такую комбинацию двух линз, которая позволяет увеличивать и как бы приближать отдаленные предметы. Услышав об этом, Галилей, разместив в зрительной трубе две линзы, сконструировал простой телескоп всего с трехкратным увеличением. В качестве первой линзы он воспользовался слабовыпуклой линзой, а в качестве окуляра — вогнутой линзой. Этот прибор по всей вероятности, отличался от того изобретения, о котором он слышал, так что можно считать, что именно Галилей изобрел театральный бинокль («opera glass»), который мы теперь иногда называем телескопом Галилея. Он был в восторге от прибора, и слава об этом чуде вскоре широко распространилась. Толпы народа стремились посмотреть в телескоп. Венецианский сенат намекнул, что был бы

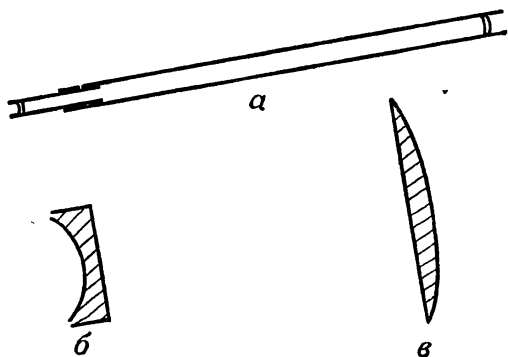
¹⁾ G. de Santillana, «Historical Introduction», to Galileo's *Dialogue*.

²⁾ Термин «составление непрерывных величин» звучит как некая попытка дифференцирования. Необходимость применения дифференциального исчисления при решении математических задач непрерывно возрастала. Галилею самому такие методы были необходимы, и он пытался их разработать. Следующее поколение еще больше стало нуждаться в подобных методах, и не удивительно, что Ньютон и Лейбниц независимо изобрели дифференциальное исчисление.

³⁾ Развитие книгопечатания обусловило более широкое применение очков, что и привело в свою очередь к изобретению телескопа в результате случайной комбинации линз.

непрочь иметь такой прибор, и Галилей незамедлительно подарил им экземпляр. Вскоре после этого его жалование удвоилось!

В свой телескоп Галилей наблюдал Луну, планеты и звезды, испытывая, по его словам, «невероятное восхищение». Если вам никогда не приходилось видеть Луну в телескоп, возьмите простой полевой бинокль и попытайтесь это проделать.



Фиг. 92. Телескоп Галилея.

а — две металлические трубы, из которых одна скользит внутри другой, с двумя линзами; б — окуляр: сильная плосковогнутая линза; в — объектив: слабая плосковыпуклая линза.

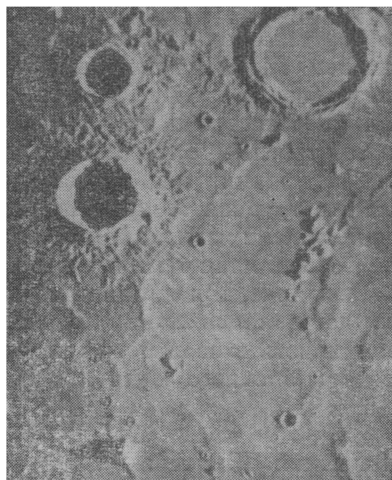
Наблюдая Луну, Галилей увидел на ней горы и кратеры. Он даже примерно оценил высоту лунных гор по отбрасываемым ими теням. Эти наблюдения были встречены враждебно теми, кому с детства внушали, что Луна — шар с гладкой поверхностью. Горы и кратеры придавали Луне сходство с Землей, а это противоречило учению Аристотеля, который проводил резкое различие между грубой, подверженной изменениям и разрушениям Землей и вечными, совершенными небесами. Телескоп нанес сокрушительный удар старой астрономии с ее идеальными сферами.

Люди по большей части консервативны и не любят, когда прищелец, упорно доказывающий свою правоту, ломает их привычные представления. Их отнюдь не радует что-то новое, они возмущаются, когда опровергают их поверья, особенно когда вера внушена им в детстве — ощущение прочности покидает их. И Галилей обнаружил, что его открытие многих просто злит. Он предлагал тем, кто приходил к нему, лично убедиться в том, что он прав, и многие, посмотрев в телескоп, действительно приходили в восхищение, однако некоторые отказывались смотреть, а кое-кто, и посмотрев, продолжал утверждать, что не верит в его открытие. Один последователь Аристотеля допускал, что горы на Луне существуют, но считал, что долины между ними заполнены невидимым хрустальным веществом, дополняющим поверхность до идеальной



Фиг. 93. Фотография Луны в последней четверти (Ликская обсерватория).

Солнечный свет, падая на вершины гор вблизи края тени, выявляет грубый ландшафт, наблюдавшийся в телескоп Галилея.

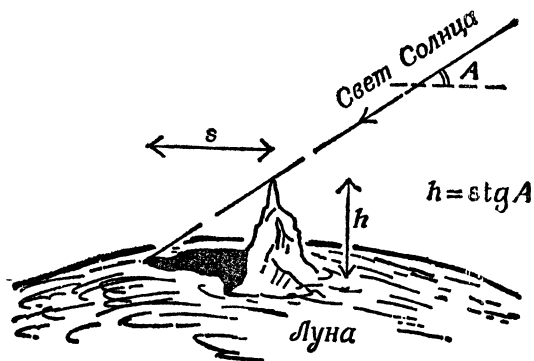


Фиг. 94. Современная фотография лунных гор (Ликская обсерватория).

Часть фотографии фиг. 93, увеличенная примерно в 6 раз. Пик внизу снимка, отбрасывающий длинную тень, — гора «Питон».

Фиг. 95. Эскиз горы «Питон» и ее тени.

Так определяются высоты лунных гор.



сферы. На это Галилей возразил, что в таком случае на Луне могут существовать и горы из невидимого хрусталя, высота которых в десятки раз больше!

Хорошие линзы было трудно достать, и Галилей сам шлифовал и полировал их в своей мастерской. Он делал это лучше других, и его телескопы оказывались намного совершеннее. И все же телескоп Галилея (сохранившийся во Флоренции) дает, конечно, несравненно худшее изображение, нежели современные приборы. Галилей построил второй телескоп с восьмикратным увеличением, затем третий — с тридцатикратным. Последний потребовал особенно много усилий: ведь придать куску стекла правильную форму — задача трудная и кропотливая, а качество прибора в значительной степени зависит именно от тщательности полировки. В новом телескопе планеты выглядели яркими дисками. Звезды тоже казались ярче, а расстояния между ними больше, но они по-прежнему представлялись лишь точками. Галилея очень радовало, что он мог видеть в свой новый телескоп гораздо больше звезд. Светлая дымка Млечного Пути превратилась в мириады звезд.

Спутники Юпитера

С помощью нового телескопа Галилей сделал еще более важное открытие. Ночью 7 января 1610 г. он наблюдал три небольшие звезды, расположенные вблизи Юпитера, на одной прямой (фиг. 96), две к востоку от Юпитера, а одна к западу. Галилей принял их за неподвижные звезды и не обратил на них особого внимания, но на следующую ночь, случайно вновь взглянув на Юпитер, обнаружил теперь все три звезды уже к западу от Юпитера, причем расположены они были ближе друг к другу, чем в предыдущую ночь. Последнее обстоятельство, т. е. сдвиг, он объяснил движением Юпитера, но потом сообразил, что в таком случае Юпитер должен был бы двигаться в *обратном направлении*, ибо находился в то время на обратной части петли. Это уже было поистине загадочно. Галилей с нетерпением ждал следующей ночи, чтобы снова провести наблюдения, но небо было покрыто облаками. На следующую ночь, т. е. 10 января, были видны лишь две звезды к востоку от Юпитера. Вряд ли Юпитер мог передвинуться на значительные расстояния с запада на восток за один день и затем с востока на запад за два дня. Галилей решил, что «звезды» сами должны двигаться, и стал наблюдать за ними (см. фиг. 96). Так он открыл четыре маленьких спутника Юпитера.

дало теорию Коперника. Один из таких философов рассуждал следующим образом:

«Голова имеет семь окон — две ноздри, два глаза, два уха и рот; небеса имеют две благоприятные звезды, две неблагоприятные, две освещающие Землю и один Меркурий, нерешительный и безразличный. На основании этих и других подобных же явлений природы, например из существования семи металлов и т. д., которые утомительно было бы все перечислить, мы приходим к выводу, что число планет с необходимостью должно быть равно семи. Кроме того, спутники Юпитера невидимы невооруженным глазом, поэтому не могут оказывать влияния на Землю. Следовательно, если бы они и существовали, то были бы бесполезны. А потому они не могут существовать...».

Галилей писал Кеплеру:

«О мой дорогой Кеплер, как мне хочется от души посмеяться вместе с вами! Здесь, в Падуе, есть профессор философии, которого я многократно и настойчиво просил посмотреть на Луну и планеты в мой телескоп, но он упрямо отказывается. Почему вас нет здесь? Как бы мы похотели с вами над этой восхитительной глупостью! А послушать только, как профессор философии в Пизе рассыпает перед великим герцогом логические доказательства, стараясь как бы с помощью магических заклинаний изгнать новые планеты с неба!»

Спутники Юпитера и третий закон Кеплера

Название спутника	Расстояние до Юпитера R		Период обращения T , час	Вычисления для проверки третьего закона		R^3/T^2
	в диаметрах Юпитера *	в милях		R^3 , (мили) ³	T^2 , (часы) ²	
Ио	3,02	262 220	42,36	$1,803 \times 10^{16}$	1802,8	Попробуйте вычислить это отношение **
Европа	4,80	417 190	85,23	$7,261 \times 10^{16}$	7264,0	
Ганимед	7,66	665 490	171,71	$29,473 \times 10^{16}$	29 484,0	
Каллисто	13,48	1 170 700	400,54	$160,440 \times 10^{16}$	160 430,0	

* Размеры орбит спутников проще всего выражать через диаметр Юпитера. Для проверки третьего закона Кеплера радиусы можно выражать в тех же единицах, если же эти данные нужны в теории тяготения (например, для сравнения массы Юпитера с массой Солнца), то следует пользоваться в обоих случаях одними и теми же единицами, скажем милями.

** Проверку легко произвести благодаря удачному выбору единиц — миль и часов.

Юпитер и его спутники представляли собой нечто вроде миниатюрной модели Солнечной системы Коперника — неоспоримое доказательство правильности его теории. Кеплер воспользовался измерениями Галилея для грубой проверки применимости третьего закона к спутникам Юпитера. Он нашел, что третий закон применим и в этом случае, хотя отношение R^3/T^2 отличается от значения, соответствующего планетам Солнечной системы. В таблице на стр. 174 приведены современные, более точные данные. С тех пор был открыт ряд еще более отдаленных спутников, меньших размеров. Сейчас известна дюжина таких спутников.

Возвращение в Пизу и Флоренцию

Когда Галилей согласился переехать во Флоренцию, ему пришлось отказаться от должности профессора в Падуе. Неожиданный отказ был встречен крайне недоброжелательно, поступок расценили как неблагодарный и даже нечестный. Однако новый пост сулил большие возможности. Галилей переехал во Флоренцию, потеряв некоторых своих друзей. Теперь у него оставалось больше времени для работы, но решение о переезде в общем оказалось неразумным, так как это было возвращение не только к друзьям, но и к врагам. (В студенческие годы Галилей был известен как «крикун и спорщик», он неистово нападал на тех, кого называл «бумажными философами».) Галилей был искренним, но не очень тактичным человеком; противодействие, которое встречали его открытия и доводы, не столько огорчало его, сколько вызывало в нем чувство торжества. — «Профессора — последователи Аристотеля, приспособляющиеся ко времени и обстоятельствам, иезуиты, занимающиеся политикой священники, а также робкие, но вполне почтенные люди, которые вечно опасаются всяких новшеств как в религии, так и в науке, объединились против деспотичного философа, поставившего под угрозу их знания»¹⁾.

Во Флоренции Галилей с помощью своего нового телескопа продолжал изучать планеты и вскоре сделал новые открытия. Он обнаружил, что у Сатурна сбоку имеются какие-то выступы, как бы прикрепленные к нему. В современные телескопы Сатурн имеет вид большого яркого шара, окруженного плоским кольцом, напоминающим поля шляпы; теперь известно, что это кольцо состоит из пылевидных частиц, возможно кусочков льда, которые незави-

¹⁾ David Brewster, цит. выше.

симо друг от друга движутся вокруг Сатурна — целое полчище, иллюстрирующее третий закон Кеплера. В телескоп Галилея кольцо не было различимо и казалось, что по бокам Сатурна имеются еще две планеты. Затем Галилей обнаружил, что у Венеры существуют фазы, подобные фазам Луны. Этот факт явился уже прямым подтверждением теории Коперника. Галилей обнаружил также пятна на Солнце — движущиеся и изменяющиеся темные участки. Еще один удар, нанесенный представлению о непорочности небес!

Галилей со своим телескопом совершил необычайно успешную поездку в Рим, где его встретили с энтузиазмом. В то время телескоп являлся чудом, и церковь одобрила открытия Галилея.

Неприятности

Галилей вернулся в Пизу с намерением написать большой трактат о строении Вселенной. Система Коперника казалась ему правильной именно вследствие своей простоты. Она неоспоримо подтверждалась наблюдениями с помощью нового телескопа. Вращение Земли устраняло необходимость в представлении о казавшемся невероятным суточном вращении внешней сферы звезд, увлекаемой как бы «огромным приводным ремнем, идущим неизвестно откуда»¹, со странными передаточными механизмами к внутренним сферам. Предположение о том, что неподвижное Солнце находится в центре, а вокруг него вращается Земля как одна из планет, упрощало движение многих небесных светил и позволяло предсказать то, что Галилей видел в телескоп. Ему удалось увидеть даже модель Солнечной системы в виде Юпитера и его спутников. Но теория Коперника противоречила поэтической библейской астрономии, которую проповедовала как римская католическая, так и протестантская церковь. Как раз в то время, когда Галилей с уверенностью почувствовал, что может доказать правильность теории Коперника, недовольство церкви внезапно усилилось. На Галилея стали нападать в проповедях, а доводы, которые он приводил в ответ, секретно отсылались инквизиции, в Рим. Друзья из Рима предостерегали Галилея, что доктрины Коперника находятся под серьезным сомнением. Ученики и друзья Галилея, включая самого герцога, благородно встали на его защиту, но он сам навлек на себя серьезные неприятности, начав писать вызывающие публичные письма о священном писании и о науке. В этих письмах он

¹ G. de Santillana, цит. выше.

утверждал, что язык Библии следует понимать не буквально, а метафорически, когда речь идет о науке. Библия, по его словам, объясняет нам явления духовного порядка, а не явления природы; при этом он цитировал слова некоего кардинала: «Святой Дух учит нас тому, как попасть на небо, но не тому, как это небо устроено». Так как священное писание и природа — создание одного и того же божественного творца, то они не могут противоречить друг другу, но служат они различным целям, и церковь не должна заставлять астрономов не верить в то, что они видят собственными глазами. Люди не должны осуждать книгу Коперника, не прочитав ее и не постаравшись ее понять. Таков был его открытый выпад.

Власти в Риме еще больше взволновались. Церковные астрономы, возмущенные писаниями Галилея, перестали его поддерживать. Встревоженный, Галилей поехал в Рим, чтобы самому выяснить сложившуюся обстановку. Но и там он продолжал непрерывно спорить как с друзьями, так и с врагами; «он не мог объяснить этим людям того, что в состоянии были понять только он и Кеплер: что три науки — математика, физика и астрономия стремятся к соединению, которое сделает их неотразимыми и создаст физическую науку о небесах»¹⁾. Тем временем церковь назначила группу экспертов по теологическим вопросам для исследования учения Коперника; эти эксперты высказались по поводу двух основных утверждений Галилея следующим образом:

УТВЕРЖДЕНИЕ, ЧТО СОЛНЦЕ НЕ ДВИЖЕТСЯ... «неверно и абсурдно с точки зрения философии и является еретическим».

УТВЕРЖДЕНИЕ, ЧТО ЗЕМЛЯ ДВИЖЕТСЯ И ВРАЩАЕТСЯ... «неверно и абсурдно и по меньшей мере ошибочно с точки зрения религии».

Галилей оставался в Риме, чтобы, как он считал, помочь дискуссии пойти по правильному руслу. Его вызвали и сказали, что доктрина Коперника осуждена как «ошибочная». На книгу Коперника наложен запрет — ни один благочестивый католик не должен читать ее до тех пор, пока она не будет исправлена». А сам Галилей не смеет ее отстаивать или защищать истинность доктрины. Галилей выждал некоторое время, чтобы его нельзя было обвинить в трусости, и вернулся домой, как подобало благочестивому католику, испытывая, однако, горькое разочарование.

¹⁾ G. de Santillana, цит. выше.

Во Флоренции Галилей оставался еще лет шесть. За это время был избран новый папа, который относился к науке более дружелюбно, чем его предшественник, к тому же он был другом Галилея. Несмотря на плохое состояние здоровья, обрадованный Галилей предпринял утомительную поездку в Рим, чтобы поздравить нового папу; на этот раз его приняли великолепно. Он получил несколько аудиенций, папа оказал ему почести и вручил богатые подарки. Галилей даже попытался осторожно доказывать папе правильность системы Коперника, подчеркивая ее простоту. Кардиналы сдержанно молчали, но сам папа заметил: «Церковь не осуждает эту систему. Ее следует осудить не как еретическую, а лишь как опрометчивую». Однако, когда Галилей стал настаивать на своих взглядах, папа резко ответил, что прежний запрет остается в силе. Он посоветовал Галилею не ограничивать мудрость господина научной схемой: *господь может создать любую схему по своему желанию* — ловкий аргумент, способный остановить развитие любой науки. Однако в конце концов папа позволил Галилею написать книгу, поясняющую доказательства, приводимые как в пользу теории Коперника, так и в пользу теории Птолемея. В книге должна содержаться лишь теоретическая дискуссия, предоставляющая высшей мудрости церкви решать, что есть истина.

Великий диалог

Галилей вернулся домой разочарованным, но все же польщенный оказанными почестями. Он был уверен в том, что получил разрешение написать давно задуманную книгу о строении Вселенной. Но он был слишком доверчив и недооценил церкви. Он продолжал тайно проповедовать идеи Коперника и писал свою книгу. Написал он ее в форме диалога — в те времена вполне обычная форма изложения. После некоторых затруднений с церковными цензорами, один из которых был личным другом Галилея, его книга была опубликована ¹⁾.

Диалог начинается с предисловия, обращенного к «благоразумному читателю», и выглядит самым неблагоприятным выпадом против инквизиции. *Диалог* ведется между Сальвиати, философом,

¹⁾ На фиг. 97 приведен титульный лист первого издания этой книги. Текстуальный перевод: Диалог Галилео Галилея, члена Академии деи Линчей профессора математики университета в Пизе и философа и главного математика его светлости Великого Герцога Тосканского, где он обсуждает в течение четырех дней две Главные Системы Мира Птолемея и Коперника (имеется русское издание в переводе А. И. Долгова, М., 1948).

который излагает точку зрения Коперника с помощью доводов Галилея, Сагрето, который, являясь как бы адвокатом Сальвиати, задает вопросы, указывает на возникающие трудности и оживляет

DIALOGO

DI

GALILEO GALILEI LINCEO

MATEMATICO SOPRAORDINARIO

DELLO STUDIO DI FISA.

E Filosofo, è Matematico primario del

SERENISSIMO

GR.DVCA DI TOSCANA.

Due ne i congressi di quattro giornate si discorre
sopra i due

MASSIMI SISTEMI DEL MONDO
TOLEMAICO, E COPERNICANO;

*Proponendo indeterminatamente le ragioni Filosofiche, e Naturali
tanto per l'una, quanto per l'altra parte.*

CON PRI



VILEGI.

IN FIRENZA, Per Gio: Batista Landini MDCXXXII.

CON LICENZA DE' SUPERIORI.

Фиг. 97. Титульный лист первого издания «Диалога».

диалог своим остроумием, и Симплицио, упрямым последователем Аристотеля и Птолемея, которого каждый раз побеждает своими доводами Сальвиати и подымает на смех Сагрето.

Диалог был написан не по-латыни для ученых, а по-итальянски — для широкого круга читателей и изобилует подробными рассуждениями и остроумными доводами. По словам одного из кри-

тиков, — это «непринужденное жизнеописание всего духовного мира того времени»¹⁾; по существу это выдающееся объяснение природы движения, земного и небесного, с исчерпывающими доказательствами правильности схемы Коперника. *Диалог* содержит много прекрасных идей и доказательств, но в нем имеются и серьезные ошибки. Галилей был великим ученым, но новая наука, которую он проповедовал, была еще не закончена и порой не ясна. Галилей никогда не понимал, что круговые орбиты не требуют подталкивания в направлении движения.

Он считал, что *вертикальное падение* присуще *земным* телам, а *круговое движение* — *небесным* телам (согласно Аристотелю), несмотря на то, что отлично понимал роль инерции в земной механике. Галилей никогда не признавал эллиптических орбит Кеплера, может быть потому, что именно круговые орбиты считал необходимыми, а может быть потому, что представлял себе, насколько *близки* действительные эллиптические орбиты планет к круговым. Он считал, что приливы и отливы вызываются «дыханием Земли» — еще более нелепое объяснение.

Книга Галилея оказалась популярной и очень убедительной. В противоположность ей книга Коперника была трудна — мало кто понимал ее истинное значение, к тому же она была запрещена. О ней велись разговоры и происходили тайные дискуссии, но большинство образованных людей не могло сложить воедино всей этой головоломки, которая благодаря приказанию свыше оставалась разобранной на части. Эту задачу выполнил *Диалог* — «собрал все воедино и впервые продемонстрировал картину в целом. Галилей не излагал в книге технических проблем; в *Диалоге* имелось много незаконченных мыслей и дерзких предположений. Однако книга соответствовала уровню образования людей того времени и непреодолимо убеждала их в правильности излагаемых идей. Это был заряд динамита, подложенный мастером своего дела»¹⁾.

Слухи об этой мощной атаке на узаконенное церковью представление о строении Вселенной дошли до Рима и стали известны папе, который, хотя и был другом Галилея, приказал инквизиции запретить книгу и вновь подвергнуть проверке взгляды Галилея. Дряхлый и больной Галилей был вызван в Рим. Там с ним в общем неплохо обошлись, признавая, что он выдающийся ученый, и представили ему даже удобное жилище, но инквизиция продолжала строгую проверку, формулируя его еретические высказывания и заставляя Галилея защищать свои идеи. Галилей знал, что его

¹⁾ G. de Santillana, цит. выше.

книга содержит опасные высказывания, но он ведь писал ее, получив на это разрешение. Первоначальный запрет был наложен лишь на утверждение, что астрономия Коперника истинна; правда, Галилей повиновался этому запрету не всегда и неискренне. Он чувствовал себя в безопасности до тех пор, пока не был представлен документ, по всей вероятности подложный, из которого следовало, будто бы Галилей обещал никогда не распространять и вообще не обсуждать систему Коперника. Теперь обвинение становилось очень серьезным: еретическое учение и написание книги, несмотря на клятву этого не делать. Не отрекшемся от ереси и не раскаявшемся еретика угрожали пытки. Галилей находился в большой опасности. Он нарушил приказ церкви; он изложил систему Коперника и опубликовал ее в виде книги (под очень сомнительным предлогом, что это лишь теоретические рассуждения); он даже осмелился критиковать интерпретацию, даваемую священным писанием. Могущественная и безжалостная церковь, которая жестоко преследовала сомневающихся и приговаривала к сожжению на костре непокорных еретиков, не могла, конечно, стерпеть столь вызывающего поведения. За стенами инквизиции с Галилеем обращались хорошо, да и в суде сначала к нему относились снисходительно; с ним спорили, предлагали привести доводы в защиту своих убеждений. Но его допрашивал суд, который обладал правом не только применить физические пытки, но и опирался на духовное превосходство церкви. Здоровье Галилея ухудшалось, а его все вызывали на допросы снова и снова. Однако он не отказывался от своих убеждений. Один из ведущих допрос, дружелюбно настроенный к Галилею, посоветовал ему сознаться в том, что он написал свой труд, движимый ложной гордыней, в этом случае его оставили бы в покое. Потеряв надежду доказать свою правоту, Галилей, наконец, согласился. Однако верховный суд церкви не был удовлетворен столь мягкой формой признания и продолжал настаивать на безоговорочном отказе от прежних убеждений. Галилей был вызван на «строгое следствие». Из судилища он вышел только через три дня. Неизвестно, насколько далеко зашла инквизиция в своем давлении на него. Физическим пыткам его не подвергали — он был слишком стар, однако ему пришлось пройти все ужасы моральных истязаний. В ходе допроса Галилей согласился полностью отречься от своих убеждений, взять назад свои еретические утверждения и признать неправильными прежние взгляды. Галилей принял приговор инквизиции как раскаивающийся грешник; не забудьте — он был набожным, хотя и любящим спорить, сыном церкви. Встав на колени, он прочитал

требуемое отречение и поклялся никогда не верить в учение Коперника и не пытаться снова его распространять. Отречение представляло собой длинный документ, состоящий из унижительных извинений, признания ошибок, полного отказа от прежних взглядов, и все это под угрозой самых суровых наказаний. Стоя на коленях, Галилей подписал отречение.

Существует легенда, будто Галилей, поднявшись с колен, пробормотал: «А все-таки она (Земля) вращается!», но вряд ли это так. Поблизости не было друга, который мог бы услышать эти слова, к тому же Галилей был стар и совершенно подавлен. По словам Бертрана Рассела, «произнес это не Галилей, а весь мир».

Некоторое время Галилей находился в заключении, затем ему было разрешено вернуться домой, но на определенных и очень жестких условиях. Здоровье его пошатнулось, однако мысль, по его словам, была еще «слишком живой для столь немощного тела». Он написал большую книгу «Две новые науки». Она содержала описание его исследований ускоренного движения (которые легли затем в основу законов Ньютона), исследований упругости бревен и его обоснование исчисления бесконечно малых. Это был не популярный труд, а подробное специальное изложение. Работая над этой книгой, Галилей ослеп на один глаз, а вскоре и совсем лишился зрения. Он говорил по поводу своего несчастья: «Увы! Ваш верный друг и слуга полностью и непоправимо ослеп. Эти небеса, эта Земля, эта Вселенная, которую я, вопреки представлениям прежних веков, своими наблюдениями, в тысячу раз увеличил, для меня теперь сжались в узкую нору, которую я сам занимаю. Так угодно господу, поэтому и для меня это должно быть хорошо». Теперь ему была предоставлена большая свобода и, несмотря на тяжелую болезнь, он с помощью друзей продолжал писать. Но здоровье все ухудшалось, и в возрасте 78 лет он умер.

Спор науки с церковью

Труды Галилея, его лекции и дискуссии выявили разногласия между авторитарными представителями церкви и независимыми учеными. Своим резким поведением и убедительностью доказательств он навлек неприятности не только на себя, но и на науку в целом. Биографы Галилея расходятся во взглядах на его конфликт с римской католической церковью, отражая тем самым собственные взгляды. Некоторые изображают его почти мучеником, находившимся под угрозой пыток со стороны фанатичной инквизиции, подозреваемым и преследуемым пленником, которому запрещалось

провозглашать открытые им великие Истины; при этом церковь выступала как главный злодей, защищавший суеверия и предрассудки и старавшийся подавить в интересах догматической науки разъяснение простых явлений природы, что должно было бы укреплять всемирную религию. Другие считали, что Галилей сам навлек на себя беды горячими спорами и той оскорбительной манерой, с которой он старался рассеять заблуждения своих противников; эти историки изображали его неблагодарным по отношению к церкви, которая старалась разобраться в его учении и помогала ему материально; они указывали на то, то конфликт Галилея с церковью возник в результате его нападок на священное писание, т. е. в результате его прямого вмешательства в область, подвластную лишь церкви. Некоторые же сожалели о его раболепном поведении, о том, что он не стал мучеником науки, но это слишком жестокие упреки тому, кто почти всю жизнь был далек от раболепия.

Бертран Рассел пишет:

«Конфликт между Галилеем и инквизицией — это не просто конфликт между свободной мыслью и фанатизмом или между наукой и религией: это конфликт между методом индукции и методом дедукции. Те, кто верит в дедукцию как в метод познания, вынуждены где-то искать свои предпосылки, обычно в священном писании. Дедукция — это метод выяснения истины, которым обычно пользуются юристы и верующие. Как метод познания дедукция терпит крах, когда возникают сомнения в правильности ее предпосылок, и те, кто в нее верит, должны неприязненно относиться к сомневающимся в непреложности истин священного писания. Галилей подвергал сомнению и учение Аристотеля, и священное писание и разрушал, таким образом, все здание средневековой науки. Его предшественники считали, что знают, как был создан мир, каково назначение человека, сокровенные тайны метафизики и принципы, управляющие поведением тел. Ничто во всей Вселенной, считали они, — ни духовное, ни материальное — не скрыто от них, ничто не таинственно, нет такого, что было бы невозможно изложить с помощью силлогизмов. А что по сравнению со всем этим богатством оставлял своим последователям Галилей? Закон падения тел, теорию колебаний маятника, эллипсы Кеплера? Можно ли удивляться тому, что разрушение накопленного богатства вызывало возмущение. Несколько истин, доказанных Галилеем, затмили тусклый свод средневековых представлений, подобно тому, как восходящее солнце своим сиянием затмевает бесчисленное множество звезд... . При противопоставлении желаемого действительно-

му знания достаются с трудом. Даже слабое соприкосновение с реальным знанием выбивает почву из-под фантазии. Но знание приходит с бóльшим трудом, нежели предполагал Галилей, и многое из того, что он считал правильным, оказалось лишь приближенно верным. Галилей сделал первый большой шаг к накоплению надежных и имеющих общий характер знаний. Поэтому его можно считать прародителем современной науки. Как бы мы ни относились к порождениям нашего времени — росту народонаселения, прогрессу медицины, поездкам, машинам, радио, политике, рекламе мыла — все это идет от Галилея. Если бы инквизиция захватила Галилея, когда он был молодым, мы возможно и не были бы свидетелями, с одной стороны, атомного оружия и отравляющих газов, а с другой, — уменьшения бедности и болезней, которые характерны для нашего века»¹⁾.

Главная ошибка и Галилея и церкви состояла в том, что схема Коперника рассматривалась не как гипотеза или часть «теории»; спор шел о том, *истинна* она или ложна.

«...было бы совершенно неверно утверждать, что церковь запретила Галилею продолжать научные эксперименты. Конфликт Галилея с церковью не имел ничего общего с его экспериментами. Он стал развиваться, если отвлечься от причин чисто личного порядка, со времени его отказа рассматривать по требованию церкви теорию Коперника как гипотезу, что в свете современной теории относительности представляется не столь уж неразумным требованием. О Галилее существует, вероятно, столько же мифов, сколько о любом святом»²⁾.

Сам Галилей, с его любовью к истине, мог более трезво относиться к теории Коперника как к гипотезе, хотя в механике он верил в абсолютно неподвижное пространство.

Новое научное течение было враждебно встречено приверженцами классического учения, хотя их предшественники в эпоху Возрождения могли с радостью пойти ему навстречу. Церковь, занятая поддержанием своего духовного и политического могущества, его страшилась. (Еще при жизни Галилея Джордано Бруно был сожжен на костре за свои еретические взгляды, в частности за то, что пользовался астрономией Коперника. Согласно Бруно, если принять, что внешняя «сфера» звезд находится в покое, то

¹⁾ Bertrand Russell, The Scientific Outlook, New York, 1931, p. 33.

²⁾ Morris R. Cohen, The Faith of a Liberal Selected Essays, New York, 1946, p. 417. В этой книге содержится прекрасный очерк о книге Галилея «Две новые науки».

звезды могут быть распределены в пространстве бесконечно далеко—мириады солнц, расположенных в небесах на сколь угодно больших расстояниях от Земли. Такое расширение границ нашей Вселенной было потрясающим новшеством для средневекового ума.) *Диалог* был занесен в число запрещенных книг, и отречение Галилея читалось с амвона церковей и с кафедр университетов, «чтобы другим неповадно было». Новая протестантская церковь оказалась столь же нетерпимой. Выйдя из-под власти папы, ее руководители придавали еще больше значения буквальному толкованию Библии. Мартин Лютер отзывался о Копернике, как о «глупце с вывернутой наизнанку астрономией». Не только в Италии, но и в других странах новая наука порицалась и строго запрещалась еще столетия.

Эта борьба отнюдь не исключение. Нечто подобное происходит почти в каждом веке. Противоречия между условиями жизни и сознанием людей, возможностями и верой приводят к борьбе между консервативными элементами, отнюдь не принадлежащими к одному и тому же слою общества, и передовыми кругами, причем причины не всегда одни и те же. В каждом веке, от Галилея до наших дней, эти битвы обычно кажутся столь серьезными, что быть на стороне борцов за новое или даже разделять их взгляды небезопасно. Спустя одно-два поколения обе стороны зачастую сожалеют о возникшей между ними вражде, однако сколь это ни печально, человечество извлекает из этого еще мало уроков. Из поколения в поколение возникающие споры каждый раз кажутся столь же важными и серьезными, какими они представлялись и в те времена. Мы приводим ниже замечание, сделанное рукой Галилея на полях принадлежащего ему экземпляра «Диалога»:

«По поводу введения новшеств. Ну, кто может сомневаться в том, что новшества, стремящиеся сделать рабами чужой воли умы, созданные богом свободными, не могут не привести к сильнейшей смуте? Требовать, чтобы люди отказывались от собственных суждений и подчинялись суждениям других, и назначать лиц, совершенно невежественных в науке или искусстве, судьями над людьми учеными, наделяя их властью обращаться с последними по своему усмотрению,— это такие новшества, которые способны довести до гибели республику и разрушить государство».

Какой бы ни выглядела жизнь Галилея в описаниях историков, его труды лежат в основе физики и служат фундаментом для всех его последователей. Они служат основой знаний, на которой им уже в то время была построена механика.

«Великие идеи извлекаются из общего котла интеллектуального развития. Они редко выпекаются в индивидуальных очагах по обычным рецептам».

Джеймс Ньюмен

Тысячелетие астрономии

В течение более чем ста веков от возникновения первых цивилизаций до Галилея астрономия прошла путь от наивных представлений, порожденных любопытством первобытного человека и его страхом перед природой, до хорошо организованной науки, готовой предоставить человечеству огромную лабораторию Вселенной для проведения исследований по механике, лежащей в основе всей физики. На протяжении многих столетий астрономией занимался лишь узкий круг составителей календарей и священников, и только изредка появлялся человек с пытливым умом, более наблюдательный, чем остальные, старающийся извлечь из запутанного клубка наблюдений суть нового закона. Пользуясь суеверием людей и их страхом перед непонятными явлениями природы, процветала астрология. Но подобно алхимии, которая много сделала для развития химии, развитию астрономии на ранних стадиях способствовала именно астрология. Затем стали появляться философы и ученые, стремящиеся к приобретению знаний ради самих знаний. Они старались извлечь из наблюдений довольно грубые рабочие схемы движения планет, Луны и Солнца. Они старались понять, чем обусловлены движения небесных светил, придумывая при этом причины, которые кажутся сейчас фантастичными и слишком сложными.

Много столетий астрономия, если не считать немногих способных наблюдателей, находилась как бы в спячке, тогда как цивилизация постепенно готовилась к новому пробуждению. В это мрачное время господствовало учение церкви и метод дедуктивных доказательств. Традиция заменяла эксперимент, предрассудки властвовали над наукой. И все же росла необходимость в науке — в медицине, в навигации. Все чаще и чаще слышались настойчи-

вые требования: «Наблюдайте то, что *происходит*; прекратите споры о том, что *должно* произойти». Предрассудки отступали на задний план, оттесняемые экспериментальными наблюдениями и выводами, которые из них извлекались.

Эпоха Возрождения

В течение трех столетий, предшествовавших XVII веку, в Европе росли и распространялись идеи Возрождения — возникали новые взгляды в искусстве и литературе, возникали новые течения в религии. Крепкие тиски традиционной схоластики слабели, вековое невежество уступало место изучению греческих авторов в оригиналах; производство бумаги и рождение печати повсеместно способствовали распространению знаний, усиливался всеобщий интерес к науке; благодаря развитию навигации возникали новые рынки, новые богатства, новое отношение к окружающему, а также новые возможности интеллектуального развития; стали развиваться свободнее искусство и ремесла, помогая проявлению беспокойного и жаждущего знаний человеческого ума.

В эпоху Возрождения постепенно родилось представление о том, что человек свободен в своих поступках и не может быть рабом и хранителем традиций того круга, к которому он принадлежит. В эту эпоху люди с энтузиазмом стремились к приобретению знаний, а общие тенденции духовного развития подготовили почву для развития в XVII столетии науки: «...гуманисты... сыграли главную роль в том процессе расширения умственного горизонта, который и сделал возможным развитие науки. Если бы не они, люди с научным складом ума никогда не сбросили бы интеллектуальных оков предвзятых теологических мнений; без них внешние препятствия могли бы оказаться непреодолимыми» ¹⁾.

В эпоху Возрождения жил человек, ученый, опередивший свое время на одно или даже на два столетия, — Леонардо да Винчи. Он был гениален во всем, за что бы ни принимался, — в живописи, скульптуре, архитектуре, в технических изобретениях, физике, биологии, философии... — он считал наблюдение и эксперимент единственным правильным подходом к науке. «Он с презрением отвергал алхимию и астрологию... природа была для него не чем-то таинственным, а повседневным, предметом первой необходимости». Он доверял логическим выводам арифметики и геометрии, так как они были основаны на концепциях универсальной истины; однако

¹⁾ William D a m p i e r , A History of Science, Cambridge, 1949.

наука, по его мнению, должна быть основана на эксперименте. Он говорил: «Бесполезны и полны ошибок те науки, которые не родились из эксперимента, матери всех фактов, и которые нельзя свести к одному ясному эксперименту». Его собственные исследования и опыты в области искусства, архитектуры, техники помогли приобрести обширные познания в различных областях науки: обнаружить свойства движения; сформулировать задолго до Галилея первый закон Ньютона в простой форме; изучить свойства потоков и давления жидкости, волн в воде и звуковых волн в воздухе; утвердить невозможность вечного движения. Он изучал также оптические явления, свойства глаза, законы перспективы. Имеются основания считать, что за 200 лет до Гюйгенса Леонардо да Винчи сконструировал маятниковые часы. Он считал, что окаменелости свидетельствуют о геологической истории Земли. Можно предположить, что именно он открыл систему кровообращения; он изучал анатомию человека и оставил целый ряд прекрасных рисунков, выполненных им при вскрытии трупов. Об этом свидетельствуют дошедшие до нас рисунки и отрывочные заметки в записных книжках. «Если бы он опубликовал свои работы, наука могла бы сразу продвинуться далеко вперед и занять место, которого она достигла лишь столетием позже»¹⁾.

«Прогресс»

Возникло представление о прогрессе как некая новая точка зрения на развитие общества. Теперь мы считаем прогресс очевидной целью — прогресс в благосостоянии, образовании и т. п. — и могли бы счесть, что наши предки тоже всегда стремились к прогрессу. Однако в течение многих столетий люди старались следовать давно сложившимся традициям «золотого» века, и идея прогресса была им совершенно чужда. Передовые взгляды в эпоху Возрождения дали новый толчок развитию науки.

Семнадцатое столетие

Гелиоцентрическая система Коперника распространялась все быстрее и быстрее по мере того, как появлялись новые экспериментальные подтверждения, расширялась свобода слова и возможности преподавания. Тихо Браге и Кеплер проанализировали движение планет и вывели на основе этого анализа простые общие «за-

¹⁾ William D a m p i e r , цит. выше.

коны». Галилей создал и развил механику; он спорил, учил и провозглашал свои идеи, стремясь утвердить науку, основанную на реальных фактах. Это был громадный прогресс от первоначальных, исполненных благоговейного страха наблюдений за планетами и затмениями до телескопа Галилея и законов Кеплера. Для этого потребовалось десять тысяч лет, и если этот срок покажется вам слишком долгим, вспомните, что речь идет всего лишь о четырехстах человеческих поколениях. И разве так уж велик этот срок для того, чтобы от наивных суеверий перейти к фактам, определенным с математической строгостью? Многие считают такой прогресс быстрым. Однако за три или четыре поколения последующего столетия наука, основанная на множестве экспериментов, сделала значительно большие успехи.

В первые годы XVII века начался новый этап развития науки. Кеплер и Галилей вели свои исследования. Астрономия была уже готова предоставить человечеству для исследований по механике огромную лабораторию, причем такую, в которой отсутствовало трение. Проведение экспериментов стало модным занятием. К началу XVIII века полученные на основе наблюдений законы движения планет были использованы для проверки общих законов механики. Ньютон разработал новый метод научного исследования, в котором построенная наугад теория должна была давать большое разнообразие результатов по методу дедукции — методу, который был известен с давних времен, однако теперь результаты и выводы следовало проверять с помощью эксперимента. Дедуктивный метод, опасный и малонаучный при словесных доказательствах, занял теперь надлежащее место в науке, обеспечивая реальную связь между теорией и экспериментом. Изменения в политической, социальной и религиозной структуре западной цивилизации предоставили науке большие возможности. На протяжении всего лишь столетия наука расцвела и стала очень популярной; экспериментальные исследования и реалистические аргументы прочно вошли в жизнь.

В создании механики и разработке теоретических основ астрономии принимали участие многочисленные ученые. Одни изобретали новые или совершенствовали приборы, необходимые для физиков, хотя последние сами «ковали» необходимые инструменты, другие старались применить новый экспериментальный подход в новых областях науки. Благодаря все возрастающему обмену знаниями началось одновременное развитие многих наук. Ученые стяжали своей стране славу, и королевские милости им оказывались за это, а не из-за суеверий и страха перед неведомыми опасно-

стями, как то бывало прежде. Кроме того, считалось, что ученые могут приносить пользу не только торговле и различного рода производствам, но и в период войн. Это был первый вклад ученых в промышленность ¹⁾, за что их деятельность в настоящее время так поощряется!

В это же время стали создаваться различные научные общества. Во Флоренции, а также в Париже были основаны Академии наук, в Лондоне — Королевское общество. Эти организации способствовали выходу науки из дебрей средневековья. Они оказывали поддержку экспериментальным исследованиям, поощряли дискуссии и обмен мнениями, но самым большим вкладом в развитие науки была публикация научных трудов. Ученым больше уже не приходилось ограничиваться личной перепиской для сообщения с своих научных открытиях. Теперь эти открытия проверялись на опыте, обсуждались, а затем публиковались в печати. С ними можно было ознакомиться и применить их на практике. Оживленная и широкая дискуссия способствовала тому, что научные проблемы буквально «вitalи в воздухе»; наступила эпоха быстрого прогресса.

Основными вехами явились имена Коперника, Тихо Браге, Кеплера, Галилея и Ньютона. Но в создании науки XVII века велика заслуга и многих других ученых. Мы приводим здесь краткие сведения о некоторых из них; труды этих ученых были связаны с физикой и астрономией. Большие успехи были достигнуты также в развитии биологии и медицины (исследования системы кровообращения, механизма дыхания, исследования по эмбриологии...).

Уильям Гильберт (1540—1603). Врач, проводил опыты по магнетизму, написал на эту тему прекрасную книгу. Проводил также опыты по электростатике.

Фрэнсис Бэкон (1561—1626). Блестящий публицист, создавший систему исследования на основе эксперимента и индукции. Его система не была практична и не внесла значительного вклада в развитие науки. Бэкон отвергал работы Гильберта и Галилея и отрицал теорию Коперника. Однако он способствовал распространению представления о том, что при-

¹⁾ Некоторые считают, что наука XVII столетия заложила основы индустриальной революции. По мнению других, последующие изменения происходили совершенно независимо от развития науки в целом и лишь благодаря некоторым фактическим знаниям.

роду нужно исследовать с помощью различного рода экспериментов, а не только описывать и обсуждать ее проявления.

Рене Декарт (1596—1650). Философ и математик. Родился во Франции в богатой семье; жизнь его протекала без особых забот, но свершил он много. Внес большой вклад в философию, математику, а также в анатомию. Исследуя оптические явления и движение тел, он был близок до некоторой степени к открытию законов Ньютона. Предложил остроумную теорию вихрей для объяснения гравитации, сил сцепления и движения планет. Самый большой вклад Декарта в науку — введение *прямоугольной системы* координат x и y , позволяющей получать алгебраические уравнения для кривых, касательных и т. д. Это открытие подготовило почву для создания дифференциального исчисления, которое позволило с помощью подобных графиков вычислять площади и строить касательные не путем измерений, а на основе решения уравнений. Такая система координат была названа в честь Декарта «декартовой» (или «картезианской»).

Отто фон Герике (1602—1686). Сконструировал действующую модель вакуумного насоса и применил ее для демонстрации существования атмосферного давления с помощью «магдебургских полушарий» — больших полых полусфер, которые нескольким упряжкам лошадей не удавалось растащить в разные стороны, если из шара, образуемого этими полушарами, предварительно был выкачан воздух.

Евангелиста Торричелли (1608—1647). Физик, создал первый барометр.

Блэз Паскаль (1623—1662). Богослов и ученый. Заложил основы теории вероятностей. Установил закон распределения давления в жидкости.

Роберт Бойль (1626—1691). Великий экспериментатор, изучавший физику вакуума, законы поведения идеальных газов, химию. Один из первых членов Королевского общества. Написал трактат «Химик-скептик».

Христиан Гюйгенс (1629—1695). Математик и физик, создатель волновой теории света. Сконструировал очень точные часы

(вероятно, первую модель маятниковых часов) с корректирующим устройством, учитывающим незначительное увеличение периода маятника при большой амплитуде. Занимался исследованиями в области механики и еще до Ньютона вывел выражение v^2/R для центростремительного ускорения.

Роберт Гук (1632—1702). Начал заниматься научной работой как ассистент Бойля, но вскоре достиг значительных успехов, получил большую известность как экспериментатор и как теоретик. Его соперничество с Ньютоном приносило ему много огорчений; гениальные труды Ньютона затмевали его собственные и умаляли его достижения. Если бы не это соперничество, в котором победителем оставался гений Ньютона, Гука можно было бы считать одним из величайших ученых XVII века. Гук с горечью утверждал, что некоторые достижения Ньютона в области механики фактически открыты им, Гуком, еще раньше. Гук был одним из первых членов Лондонского Королевского общества.

Эдмунд Галлей (1656—1742). Астроном, друг Ньютона. Много сделал для того, чтобы помочь публикации «Принципов» Ньютона. Один из наиболее значительных членов Королевского общества.

Наука

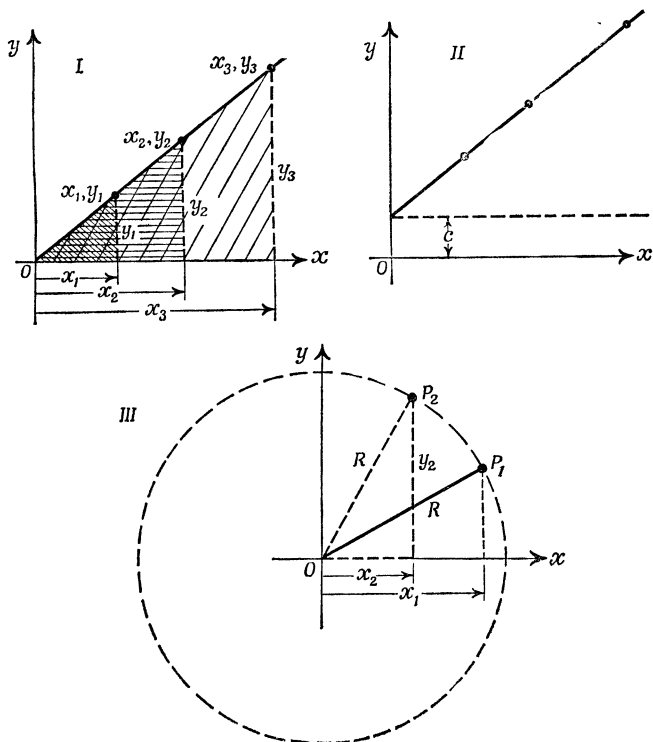
В тот период наука развивалась по пяти основным направлениям: 1) по мере роста свободы слова росло и *общее значение науки*, основанной на эксперименте; 2) происходило накопление *фактических знаний и теории*, объясняющей полученные результаты; 3) развивались *математические методы* для решения тех или иных задач; 4) изобретались и конструировались *новые приборы* для проведения экспериментов и, наконец, 5) изменялись *научные методы и отношение к науке*.

1) *Возросшее значение науки*. На примере жизни Галилея мы уже видели, как возросло значение науки в ту эпоху. Отец Галилея считал математику да и науку вообще плохо оплачиваемым и малоуважаемым занятием, и все же Галилей, несмотря на бунтарский нрав, в конце жизни был уважаем как один из величайших людей в мире. Ньютону, Бойлю и Гуку не приходилось отстаивать свои научные позиции; они спорили лишь о своих открытиях, а не о праве на само открытие. Они писали свои труды, не

страшась осуждения и не боясь показаться смешными, их заботили лишь приоритет и слава. Дискуссии и публикации трудов помогали науке становиться общенародной и универсальной. Так истинность науки начала воздействовать на человеческий разум.

2) *Накопление знаний.* Научные достижения XVII века значительны и многообразны: к ним следует отнести законы Кеплера, открытие кометы Галлея, закон Гука, открытие Гарвеем системы кровообращения, открытия Бойля в области химии и его закон для идеальных газов.

3) *Достижения в области математики.* Была изобретена декартова система координат. Графики связали алгебру с геометрией,



Фиг. 98. Графики в декартовой системе координат.

с одной стороны, сводя геометрические формы и преобразования к сжатым алгебраическим выражениям, а с другой — позволяя наглядно представлять алгебраические уравнения.

На графике I фиг. 98 изображена проходящая через начало координат прямая линия, на которой нанесены точки (x_1, y_1) , $(x_2, y_2), \dots$. Из подобия треугольников следует, что отношения $y_1/x_1, y_2/x_2, \dots$ равны между собой, т. е. одинаковы для любой точки на прямой. Обозначим эту постоянную k . Тогда каждая точка на прямой будет представлена парой значений (например, x_1, y_1), удовлетворяющих соотношению $y/x=k$ или $y=kx$. Это и есть алгебраическое описание графика, а прямая представляет собой геометрический образ данного соотношения. Если y и x — результаты физических измерений (например, s и t^2 для падающего тела), то прямая линия выражает соотношение $y=(\text{const})x$, или $y \sim x$, а наклон прямой определяет постоянную.

График II иллюстрирует уравнение $y=kx+c$. В этом случае мы не можем сказать, что $y \sim x$, но можем сказать, что $\Delta y \sim \Delta x$.

На графике III изображена окружность, причем для точки P_1

$$x_1^2 + y_1^2 = R^2;$$

для точки P_2

$$x_2^2 + y_2^2 = R^2;$$

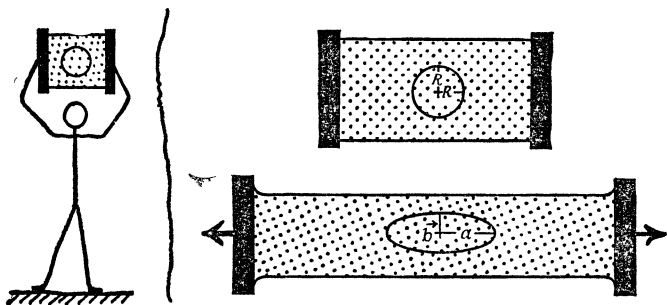
таким образом, уравнение этой окружности имеет вид

$$x^2 + y^2 = R^2.$$

Его можно переписать так:

$$\frac{x^2}{R^2} + \frac{y^2}{R^2} = 1.$$

Эллипс можно получить равномерным растяжением окружности. Нарисуйте окружность на листе резины и растяните этот лист (фиг. 99). Радиус R превратится в полуоси a и b . Окружность в со-



Фиг. 99. Растяжение окружности в эллипс,

ответствии с уравнением $x^2/R^2 + y^2/R^2 = 1$ и с площадью круга $\pi R^2 = \pi R \cdot R$ превратится в эллипс, описываемый уравнением...?..=1 и площадью= ?

Таким образом, с помощью декартовой геометрии эллиптические орбиты можно записать в виде алгебраических уравнений.

Возникли две серьезные математические проблемы, связанные с вычислениями: *определение* угла наклона касательных к кривым и площадей под кривыми с помощью *математики*, т. е. создание методов *дифференцирования* и *интегрирования*. Тангенс угла наклона касательной определяет скорость изменения функции. Вычисления сводятся просто к нахождению *скорости* изменения функции в некоторой точке. Это позволяет нам вычислять *ускорения* из выражения, описывающего *изменение скорости*, или *скорости* из выражения, связывающего *расстояние* и *время*. (Например: если дано $s = 16 t^2$, то $v = 32 t$; отсюда следует, что $a = 32$, т. е. постоянное значение.) Интегрирование — операция сложения бесконечно большого числа бесконечно малых величин: нахождение площади путем сложения элементов исчезающе малых размеров (как и в случае второго закона Кеплера) или нахождение силы притяжения между телами конечных размеров путем суммирования сил притяжения бесконечно малых элементов объема этих тел.

Вы уже пользовались графиками и вычислениями ранее, при решении задачи о колесе, катящемся вниз с холма.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ→ГРАФИК. Вы наносите на график зависимость s от t^2 . Точки изображают события. Проведенная через эти точки прямая представляет собой совокупность фактов.
2. РАЗМЫШЛЕНИЯ→ТЕОРИЯ. Предположите, что ускорение постоянно, рассматривая это как возможный простой закон природы. Вычислите необходимое соотношение между s и t . При интегрировании будут складываться все маленькие расстояния, проходимые с возрастающей скоростью; при этом получится, что при постоянном *ускорении* s должно меняться пропорционально t^2 .
3. ПРОВЕРКА. Проведите через начало координат прямую, представляющую теоретическое соотношение $s \sim t^2$. Если ваши точки лежат близко к этой прямой, то это значит, что движение колеса происходит с ускорением, близким к постоянному. Прямая линия на вашем графике «пробная»; проводя ее, вы отвечаете на вопрос, «имеет ли место движение с постоянным ускорением». Проведя на вашем графике наиболее подходящую к экспериментальным точкам кривую, вы подтвер-

дите вашу гипотезу — и получите таким образом закон, справедливый в данном случае.

4) *Развитие приборостроения.* Новые приборы, как и новые математические методы, могут способствовать быстрому развитию науки. Семнадцатый век был веком многочисленных изобретений в области приборостроения: телескоп, микроскоп, вакуумный насос, барометр, маятниковые часы, первые термометры — все эти приборы содействовали необычайным успехам экспериментальной физики и науки в целом.

5) *Отношение к науке и новые методы.* От древних греков до Галилея наука создавалась теми, кто собирал, наблюдал, составлял и размышлял¹⁾. Собиратели накапливали знания, которые были столь бессистемны, что их вряд ли можно было назвать наукой. Те, кто составлял схемы, систематизировали эти знания и извлекали из них правила, которые служили практическим целям, ибо позволяли зачастую суммировать факты и даже делать предсказания. Эти правила вместе с накопленными знаниями и методами для приобретения новых знаний и положили начало новой науке. Тем временем мыслители были заняты объяснениями, т. е. утверждениями, которые позволяли бы связать полученные знания между собой и обеспечить их лучшее «понимание» и восприятие. Многие объяснения или доводы рождались только на основе размышлений, почти вне связи с опытом.

Например, эпициклы объяснялись «идеальностью кругов», а принцип действия барометра — «невидимыми нитями, которые тянут ртуть вверх». Некоторые объяснения были не более чем простой констатацией фактов, вроде авторитетного заявления, что природа «устроена именно так»; например, поведение падающих тел объяснялось тем, что они стремятся занять «естественно» наиболее низкое место на земле.

Человек должен был получить уверенность в том, что внешний мир устроен просто, в противном случае его одолевал бы страх перед неизвестным и он запутывался бы во все больших суевериях. По мере установления общих законов — схемы эпициклов, закона Гука, законов Кеплера — возрастало чувство надежности, и преж-

¹⁾ Мы можем проследить подобную деятельность некоторых людей начиная с детских лет. Юношеское увлечение коллекционированием марок или монет может превратиться в стремление накапливать научные данные, а мрачная решимость многих юношей преодолевать встающие перед ними трудные проблемы может превратиться в стремление к точности, столь характерное для Тихо Браге.

ная вера в то, что природа подчиняется определенным законам и устроена разумно, приобретала научную основу. Древние греки выводили свои объяснения и схемы явлений природы из нескольких общих идей, которые они просто принимали на веру. Например, из «совершенства кругов» они выводили эпициклы.

В течение XVII столетия дедуктивный метод рассуждений попал в немилость; в самом деле, он фактически навязывался известными авторитетами, но не имел научной основы. В середине этого столетия эксперимент стали считать реальным источником данных и проверки научных знаний. Люди занялись созданием правил или законов на основе экспериментов с помощью индуктивного метода. При этом они тоже считали, что природа проста и неизменна, т. е. что при тех же самых условиях будут снова и снова наблюдаться те же явления. Они все еще считали, что явления природы обусловлены некими *причинами*, однако смысл и значение этих причин оставались по-прежнему неясными.

Хотя индуктивный метод был честным методом, позволяющим выводить правильные законы, ему недоставало умения связывать явления воедино, и с его помощью нельзя было достичь того удовлетворения, которое дает настоящая теория. Ньютон, одаренный огромной интуицией, сначала рассматривал эксперимент, затем переходил к теории, а уж потом с помощью дедуктивного метода на основе этой теории предсказывал результаты, которые можно было впоследствии проверить. Таким образом, теория снова заняла свое место в науке, но уже на более надежном фундаменте. Она опять стала играть важную роль, как, например, теория всемирного тяготения, но уже *не как хозяйин науки, а скорее как ее слуга*.

Еще позже, в прошлом веке, теория стала все более и более зависеть от того, насколько она продуктивна. Ученые спрашивали: «Может ли эта теория делать предсказания?» Если нет, ее отбрасывали или видоизменяли. Теперь такое обращение с теорией кажется нам слишком поспешным. Ее польза может заключаться не только в способности правильно предсказывать те или иные факты, но и в той схеме рассуждений, которую она нам предлагает.

Новая философия Декарта

Точка зрения ученых на науку менялась в соответствии с духом времени. Во Франции Рене Декарт предложил новую философию, которая длительное время оказывала сильное влияние на научное мышление. Одновременно с этим Декарт предложил новую модель Вселенной, и эта модель пользовалась популярностью в течение

целого столетия. Убедившись в ошибочности классической философии, Декарт стал рассматривать мир в соответствии со своими собственными мыслями и чувствами, ставя под сомнение каждый свой вывод и проверяя его. На основе своих рассуждений он пришел к *дуализму* — представлению о двух различных мирах, существующих совместно и *одинаково реальных*: мир материи, обладающий размерами, формой и движением, и мир души и ума. Подобно тому как двое часов, находящихся рядом, могут показывать одинаковое время, так и эти два мира, совершенно отдельные, находятся в согласии, потому что «бог создал их таким образом».

В этой схеме материя — это нечто совершенно мертвое, неодушевленное, способное лишь обмениваться движением с другой материей при соприкосновении. Движение материи первоначально должно было начаться по велению бога. Таким образом, согласно Декарту, бог уже не постоянно присутствующая сила, управляющая миром, а первопричина, которая привела Вселенную в движение, установив законы этого движения и предоставив ее затем самой себе. С тех пор движение может лишь передаваться от одной части материи к другой также с помощью материи. Поэтому пространства в Солнечной системе не могут быть пустыми. Они должны быть заполнены невидимым веществом, «эфиром» — носителем этого движения. Поскольку движущаяся область эфира не может простираться неограниченно, она должна образовывать замкнутые цепи, водовороты или *вихри*.

Таким образом, все пространство заполнено вихрями «эфира», большими и малыми, переплетающимися и обуславливающими движение видимых тел. Планеты движутся по своим орбитам под действием огромного вихря, принадлежащего Солнцу. Земля, вовлекаемая в этот вихрь вместе с другими планетами, имеет свой собственный меньший вихрь, который притягивает к ней предметы. Падение под действием силы тяжести подобно движению соломинки на поверхности воды, которая стремится попасть в центр водоворота. В меньшем масштабе эта картина объясняет силы притяжения между малыми частицами материи.

Такая схема одних водоворотов внутри других кажется нам теперь фантастичной; однако в те времена она имела хождение, ибо объясняла Вселенную в виде огромной машины, запущенной самим богом и продолжающей затем вертеться в соответствии с законами механики. Действительно, декартова картина Вселенной без пустоты, работающей подобно огромной машине, явилась серьезным препятствием, с которым пришлось считаться Ньютону, опубликовавшему свою теорию всемирного тяготения.

Ньютон допускал существование вакуума и не объяснял происхождения сил тяготения и их первопричины. Теория Декарта, казалось бы, объясняла многое, но не имела сколько-нибудь солидных оснований — вихри невозможно было обнаружить, о них можно было лишь судить по тем движениям, существование которых они должны были объяснять. Ньютон занялся критикой вихрей с математической точки зрения. Показав, что они противоречат третьему закону Кеплера, и возражая против этой теории, он заявлял: «Я не измышляю гипотез».

Итак, Декарт разрешил сомнения, придя к выводу, что, создав Вселенную, бог позаботился и о действующих в ней законах. Декарт считал, что законы природы должны быть непогрешимы, ибо, создавая их, бог не мог совершить ошибки. Такая точка зрения на законы природы оказала сильное влияние на последующее поколение ученых — Ньютон и его современники считали, что они ищут великие законы, установленные богом, но еще не открытые.

Если вам покажется странной такая точка зрения трезво мыслящих ученых, то задумайтесь над тем, что те же самые проблемы существуют и сейчас на границе естественных наук и философии: какова природа пространства (носителя электромагнитного и гравитационного полей, описываемого релятивистской геометрией)? Что означают законы природы? С какого момента следует вести отсчет времени? Будет ли время продолжаться бесконечно?

Фрэнсис Бэкон

В то время как Декарт пытался объяснить происхождение Вселенной и ее законы на основе опирающейся на математику *дедуктивной* теории, в Англии Фрэнсис Бэкон пропагандировал *индуктивный* метод, основанный на систематических экспериментах. Он хотел достигнуть универсальных знаний с помощью организованной системы исследований, позволяющей собрать большое количество данных, на основе которых можно было бы приобрести необходимую информацию. Он считал, что наука не может идти вперед с помощью чистой дедукции и умозрительных рассуждений и не может быстро развиваться на основе случайно полученных данных. Ученые должны тщательно продумывать свои эксперименты и обрабатывать их, прибегая к индукции и строгой проверке.

Таким образом, Бэкон понимал разницу между «хорошим экспериментом» и «возней с тем или иным прибором». Если вы с удовольствием занимаетесь своей работой в лаборатории, то поймете

его точку зрения, хотя, может быть, и не так-то легко сформулировать этот критерий научных исследований.

При исследовании движения колеса, скатывающегося с холма, вы следовали методу Галилея и Ньютона: собирали информацию, извлекали правила, придумывали гипотезу, делали выводы, проверяли эти выводы (строили на графике прямую) и т. д.

Фрэнсис Бэкон считал, что в науке нужны именно такие схемы; однако если вам доведется наблюдать за работой ученых, то вы убедитесь, что методы исследования бывают самые разнообразные. Развитие физической науки нельзя уподобить шахматной игре с ее поочередными ходами; оно значительно сложнее и многообразнее. Нельзя также считать, что прогресс происходит лишь скачкообразно. Первая стадия размышлений и экспериментов может даже привести назад, к исходной точке — «вот из чего мы исходили», но при этом мы обогащаемся знаниями, которые оказываются полезными на следующей стадии (как при вторичном просмотре одного и того же фильма). По этому поводу говорят, что «наука сама себя вытаскивает за волосы».

Бэкон очень красноречиво доказывал необходимость создания организации профессиональных экспериментаторов и теоретиков. Но грандиозная схема была слишком искусственной, чтобы иметь успех; к тому же она преследовала скорее практические цели и не позволяла получить исчерпывающее понимание явлений природы. (В известной мере это похоже на неуместное рвение, которое и в наше время проявляет человек, не обладающий высокой научной квалификацией, но назначенный на пост директора большой научно-исследовательской лаборатории.) Предложения Бэкона оставались лишь бумажными схемами, но тем не менее они оказали большое влияние на членов Королевского общества, в частности на Бойля. Примерно к середине столетия «...под влиянием Бэкона искусство уступило место науке...»¹⁾. В настоящее время, спустя два столетия, мы видим, что в более глубоком смысле науку тоже можно считать искусством.

Развитие теории; необходимость современной науки

Семнадцатый век был бурным веком для астрономии, как, впрочем, и для других областей науки. Начало этого века ознаменовалось накоплением фактов и законов, которые требовали объясне-

¹⁾ Dorothy S t i m s o n, *Scientists and Amateurs, A History of the Royal Society*, New York, 1948.

ния. Назрела необходимость в общей теории, которая могла бы объяснить и объединить целый ряд явлений. К концу столетия запас знаний и вызываемый ими интерес возросли и расширились, однако самым важным событием явилась созданная и опубликованная Ньютоном теоретическая схема, давшая единое «объяснение» и обещавшая еще больше в будущем.

Если вы хотите постичь современную физику, вы должны изучить лежащую в ее основе теорию. Вы должны почувствовать, какая теория «правильна». Едва ли вы узнаете об этом из поучений и рассуждений *относительно* теории. Надо просто изучить ее на каком-либо примере. В последующих четырех главах мы опишем и обсудим теорию всемирного тяготения Ньютона.

«...все науки по мере совершенствования становятся по своему характеру математическими».

А. Н. Уайтхед (1911 г.)

Орбитальное движение

Что заставляет планеты двигаться по орбитам Кеплера? Почему они находятся в постоянном движении и почему их орбиты представляют собой эллипсы? Эти вопросы вытекают естественным образом из открытий Кеплера, согласно идущей еще от философов Греции древней традиции задавать вопрос *почему*. Астрономы измерили и зарегистрировали то, *как* планеты ведут себя, т. е. их видимые движения. Коперник и Кеплер показали, *каким образом* движение планет может быть описано простой схемой, но на все эти «почему» они отвечали лишь в духе своего времени. Коперник допускал существование вращающихся сфер, считая, однако, что их движение должно быть проще, чем это следовало из системы Птолемея; Кеплер представлял себе некие рычаги, осуществляющие воздействие Солнца на планеты и толкающие их *вдоль направления их движения*; он говорил о мистическом магнетизме, придающем форму орбитам. Его рычаги были реальны только в одном смысле: они были необходимы для выражения его второго закона и дошли до нас в образе геометрических линий, прорезывающих площади.

Задача 1. Вычитание векторов

При изучении движения планет нам будет необходимо производить вычитание векторов. Эта задача дается вам для практики.

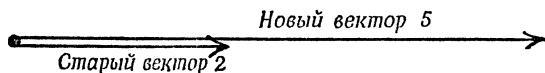
1. Обычное (арифметическое) вычитание. Предположим, что мы хотим из 5 вычесть 2. Это можно сделать различными способами:

- а) можно сказать: 2, вычтенное из 5, дает 3, или то же самое, но другими словами: $5 - 2$ равно 3;*
- б) можно изменить знак с $+2$ на -2 и задать дополнительный вопрос: сколько будет $5 + (-2)$?*
- в) можно подойти к задаче по-детски и спросить: сколько мы должны добавить к 2, чтобы получилось 5?*

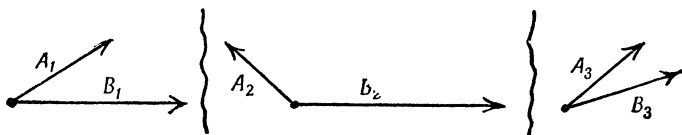
Последний прием дает ключ к вычитанию векторов (или нахождению разности двух векторов).

2. Векторы. Предположим, что мы имеем «старый» и «новый» векторы и хотим найти их разность. Мы спрашиваем: «Какой вектор нужно добавить к «старому», чтобы получить «новый» вектор?» [Эта задача подобна вопросу пункта (в), однако теперь требуется выполнить геометрическое сложение.]

а) Если оба вектора, старый вектор 2 и новый вектор 5, направлены на восток, то какова будет их разность? Какой вектор нужно добавить к вектору 2, чтобы получился вектор 5? Изобразите это:

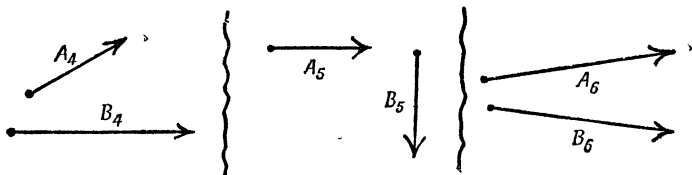


б) Если векторы (старый вектор A и новый вектор B) направлены в разные стороны так, как это показано на схеме



то что же тогда будет их разностью? «Что должно быть добавлено к вектору A , чтобы получился вектор B ?» Покажите это стрелками для каждого случая. В каждом случае мы должны вычесть A из B .

в) Если векторы не приложены к одной и той же точке, вы должны сначала перенести один из векторов или оба в общую точку. После этого найдите, вновь пользуясь стрелками, разность $B - A$ для каждого случая, изображенного здесь:



Кеплеровы жесткие «рычаги», предназначенные для осуществления движения планет, вскоре оказались ненужны: новое учение Галилея представило всю проблему в другом свете. По мнению Галилея, движущееся тело, предоставленное самому себе, будет продолжать двигаться; он предложил остроумный мысленный эксперимент для обоснования такого взгляда. Поколением позже Ньютон выразил то же самое посредством некоторого рабочего правила, а именно своего первого закона:

Каждое тело остается в состоянии покоя или прямолинейного движения с постоянной скоростью, если на него не действует сила.

Позже Ньютон более четко представил эту расплывчатую идею о движении с помощью определенного количества движения, которое можно рассчитать путем умножения массы на скорость, и сформулировал второй закон:

Действующая сила изменяет количество движения в направлении своего действия.

СКОРОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ДВИЖЕНИЯ
ПРЯМО ПРОПОРЦИОНАЛЬНА ДЕЙСТВУЮЩЕЙ СИЛЕ.

Это было эквивалентно следующему утверждению:

Произведение массы на ускорение пропорционально результирующей силе.

В период между Галилеем и Ньютоном эти новые представления о движении (к которым на ощупь шли философы далекого прошлого и которые были частично установлены Леонардо да Винчи много раньше Галилея и Декартом после него) зрели для того, чтобы сыграть свою роль в астрономии. Члены только что созданного Королевского общества, которые вскоре приветствовали пришедшего в их ряды Ньютона, горячо обсуждали законы Кеплера, задавая совершенно другие вопросы *почему*. Они больше не беспокоились о внешнем воздействии, направляющем планеты вдоль их траекторий. Галилей убедил их, что нет никакой необходимости в подталкивающей силе; планеты будут продолжать двигаться сами по себе, если их оставить в покое, подобно куску льда на поверхности замерзшего пруда или пуле в пространстве.

Ученые отбросили представление о кеплеровых рычагах. Вместо них были введены внутренние силы, заставляющие планеты двигаться по искривленным орбитам. Такие силы создают усилие «поперек движения» планеты и будут сообщать ей импульс в новом направлении. Что это за силы? Новый вопрос повис в воздухе. Гук, Гюйгенс и Ньютон взялись за его решение.

Считая орбиты планет примерно круговыми и опираясь на третий закон Кеплера, они предположили, что между Солнцем и планетами существует взаимное притяжение, которое уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния между ними (см. следующую главу). Но может ли эта сомнительная и совершенно непонятная сила заставить планеты следовать по эллиптическим орбитам в соответствии с первым и вторым законами Кеплера? Разобраться в этом было непосильной задачей для всех, кроме Ньютона.

Задача потребовала ясной формулировки законов движения и искусного математического аппарата. Ньютон не только решил эту задачу, но и превратил это решение в основу хорошей теории. Прежде чем изучать его работы, следует распространить обсуждение вопроса о силе и движении на случай новых сил, искривляющих траекторию движущихся тел. Вы уже встречались с аналогичной ситуацией при рассмотрении полета снарядов, когда вследствие силы тяжести к горизонтальному движению добавляется вертикальная составляющая и в результате траектория становится криволинейной. Это ускоренное движение кажется более легким для понимания. Осмелимся сказать: «кажется более естественным», нежели равномерное движение по круговой орбите с постоянной скоростью.

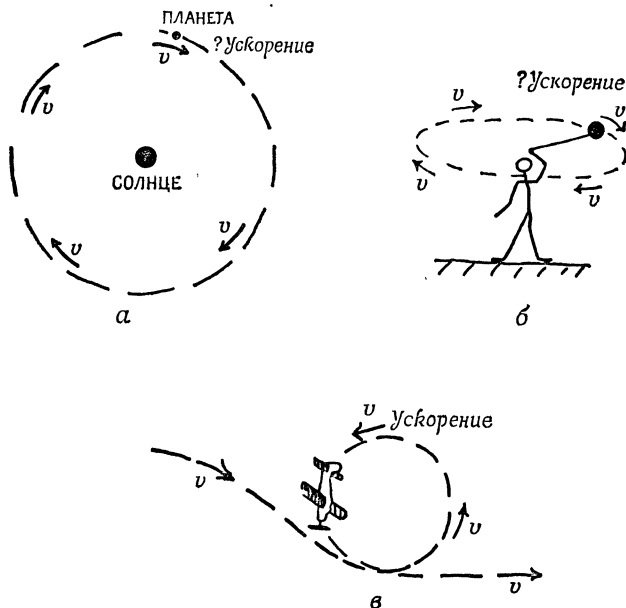


Фиг. 100.

Ускорение тела, движущегося по окружности

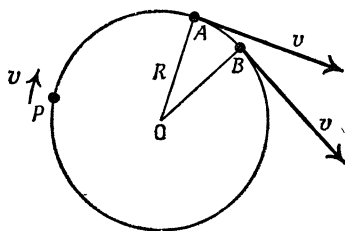
Рассмотрим планету, движущуюся по окружности (камень на веревке, или самолет, или атом, фиг. 101). Будут ли они иметь ускорение? Если нет, то нам трудно будет отыскать действующую на них результирующую силу, но тогда почему они не движутся вперед по прямой? Так все же не имеет ли планета ускорения? Конечно, ускорение *вдоль* направления ее движения отсутствует, ведь мы выбрали случай движения с постоянной скоростью. Может быть, имеется ускорение, направленное *поперек* движения планеты, перпендикулярно ему? Попытаемся нарисовать векторы, с помощью которых можно было бы рассмотреть изменение (вектора) скорости. Пусть тело P перемещается по окружности радиусом R с *постоянной* скоростью v , представляющей абсолютную величину вектора скорости тела P . Направление скорости совпадает с направлением перемещения тела в каждый момент времени. В точке A вектор скорости тела v направлен, как это показано на фиг. 102, по касательной. Если тело движется с *постоянной* скоростью, то в точках A и B величина *вектора скорости* v будет одной и той же, но нап-

равление будет различным, оба вектора не идентичны. Между точками A и B происходит изменение скорости. (А вследствие этого



Фиг. 101.

и ускорение, а поэтому... продолжая эти рассуждения, мы доберемся до планетной астрономии.) Для определения «ускорения»

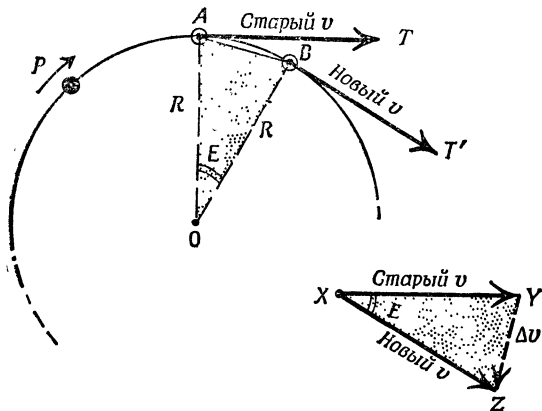


Фиг. 102. Векторы скорости,

рассчитаем изменение скорости и поделим его на соответствующий интервал времени. Такая процедура предусматривает вычитание векторов для нахождения изменения скорости, что уже было сделано в задаче 1 в начале этой главы.

Вывод формулы $a = v^2/R$

По мере движения тело P изменяет свою скорость от (v вдоль AT) до (v вдоль BT'). Для определения изменения скорости построим векторную диаграмму. Перенесем эти два вектора в общую точку X и проведем линию XU , представляющую вектор скорости v в точке A , и линию XZ , представляющую вектор скорости v в точке B .



Фиг. 103. Изменение скорости.

Скорости направлены по касательным, перпендикулярным радиусам, поэтому треугольник OAB подобен треугольнику XYZ векторной диаграммы.

Тогда XU будет «старая скорость», а XZ — «новая скорость». Каково же изменение скорости? Какой вектор следует добавить к старому вектору скорости для получения нового вектора скорости? Такое изменение показано с помощью отрезка YZ , представляющего собой вектор и обозначенного Δv на фиг. 103. Тогда

$$(\text{Старый вектор } v) + \Delta v$$

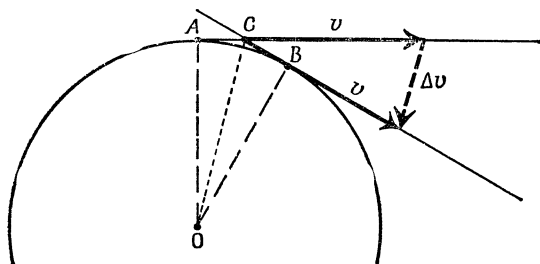
путем сложения векторов дает

$$(\text{Новый вектор } v).$$

Чтобы увидеть, куда направлен вектор Δv , изобразим заново первоначальный рисунок, но таким образом, чтобы векторы v сместились вдоль своих направлений до совмещения их точек приложения в точке C (фиг. 104). Тогда мы можем рассматривать точку C в качестве X , провести из этой точки старый вектор v и новый

вектор $\mathbf{v}$ и провести также вектор $\Delta \mathbf{v}$. Вектор $\Delta \mathbf{v}$ параллелен линии CO , проведенной из точки C в центр круга O . Если поместить точку B очень близко к A , то $\Delta \mathbf{v}$ будет направлен по радиусу от AB к центру. Вектор $\Delta \mathbf{v}$ — это вектор скорости, направленный к центру круга.

Ускорение возникает только при изменении скорости ¹⁾. Рассчитаем это ускорение путем деления величины изменения скорости Δv на интервал времени Δt , за который это изменение происходит. Время Δt равно времени прохождения телом P расстояния по орбите между точками A и B со скоростью v . Фактически скорость v есть дуга $\widehat{AB}/\Delta t$. Для выражения $\Delta v/\Delta t$ через v и R и т. д. мы вынуждены обратиться к геометрии, открытой современниками Ньютона. Соединим A и B хордой $\overline{AB}$. Вся хитрость состоит (как



Фиг. 104. Направление изменения скорости.

это часто делается для решения геометрических задач) в добавлении одной вспомогательной линии, в данном случае хорды $\overline{AB}$. Рассмотрим теперь подобные треугольники на реальном рисунке и векторной диаграмме скоростей (фиг. 103). Радиусы OA и OB на реальном рисунке образуют небольшой угол E . Векторы скорости направлены по касательным перпендикулярно радиусам так, что вектор старой скорости v и вектор новой скорости v образуют тот

¹⁾ Начиная с этого момента мы больше не будем рассматривать $\mathbf{v}$ и $\Delta \mathbf{v}$ в качестве векторов и не будем обозначать их жирным шрифтом, так как мы переходим к вычислению абсолютной величины ускорения, используя скорость v , которая является величиной вектора скорости, и Δv , которое является величиной изменения вектора скорости. Будем помнить, однако, что ускорение имеет направление, совпадающее с направлением вектора $\Delta \mathbf{v}$.

же маленький угол E^1 . Тогда на реальной картинке мы имеем треугольник OAB с равными сторонами R и R , образующими угол E ; на векторной диаграмме имеется треугольник XYZ с равными сторонами v и v , образующими тот же угол E . Поэтому треугольники OAB и XYZ подобны. Значит, должно иметь место следующее соотношение:

$$\frac{\text{Короткая сторона, } \Delta v}{\text{Одна из равных сторон, } v} = \frac{\text{Короткая сторона, } AB}{\text{Одна из равных сторон, } R}$$

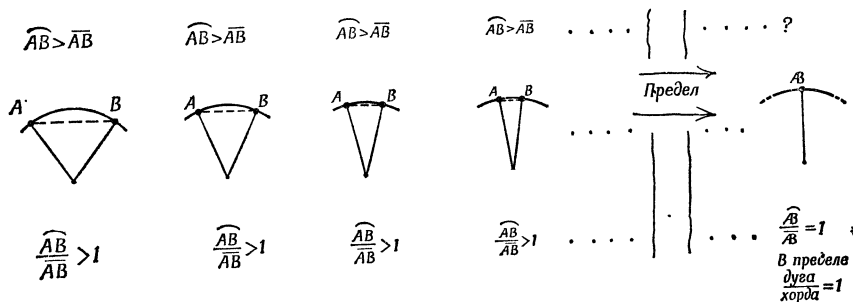
в некотором треугольнике в реальном треугольнике

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{AB}{R} \qquad \Delta v = \frac{v \cdot AB}{R}$$

Теперь мы можем рассчитать «ускорение»:

$$\text{УСКОРЕНИЕ} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v \cdot AB}{R} \bigg/ \Delta t = \frac{v}{R} \cdot \frac{AB}{\Delta t}.$$

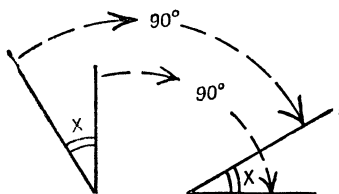
Для дальнейшего нам необходимо установить, что такое $AB/\Delta t$.



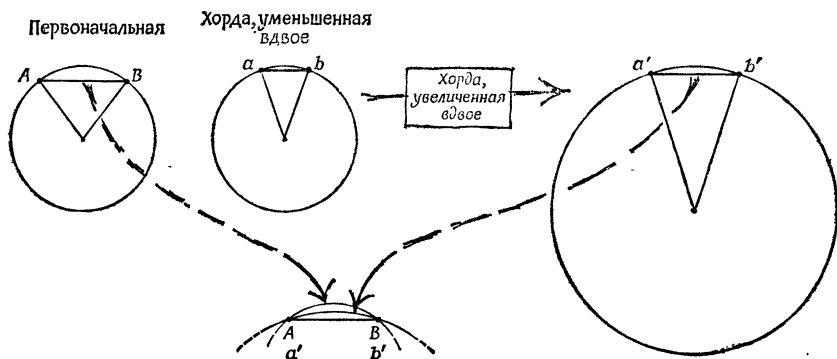
Фиг. 105.

Что представляет собой $[(\text{хорда } AB)]$, деленная на (время движения от A до B)? Мы знаем, что такое дуга $AB/\Delta t$. Это отношение

¹⁾ Если вы возьмете две линии, образующие угол X , и повернете каждую линию на 90° , то таким способом повернете все изображение на 90° и эти две линии в новом положении будут по-прежнему образовывать угол X .



(расстояние)/(время) на участке орбиты от A до B , т. е. скорость v . Но для очень короткой дуги, когда B близко к A , криволинейная дуга $\widehat{AB}$ очень близка к хорде $\overline{AB}$. Посмотрите на серию картинок, показанных на фиг. 105. По мере сближения A и B дуга $\widehat{AB}$ и хорда $\overline{AB}$ становятся все меньше, в то же время уменьшается и различие между ними¹⁾. Говоря математическим языком, мы приближаемся к «пределу», когда B совпадает



Фиг. 106.

с A . Мы никогда не достигаем этого предела, но мы можем к нему приблизиться настолько, насколько захотим, и сделать различие между дугой и хордой настолько малым, насколько захотим.

Однако мы не только можем сделать разность $\widehat{AB} - \overline{AB}$ пренебрежимо малой — мы можем сделать пренебрежимо малым отношение (разность/хорда) или $(\widehat{AB} - \overline{AB})/\overline{AB}$. Это приводит к тому, что $\widehat{AB}/\overline{AB}$ становится очень близким к единице. Таким образом, мы можем сказать, что при большом расстоянии между A и B дуга *немного больше хорды*, при малом расстоянии дуга *примерно равна хорде*, а при еще меньшем расстоянии дуга *почти равна хорде*. При сколь угодно малом расстоянии в пределе дуга равна

¹⁾ Если вы не верите такому рассуждению и утверждаете, что расхождение между дугой и хордой остается неизменным и лишь маскируется сближением A и B , последуйте следующему случаю — фиг. 106: выберите размер AB , затем перейдите к хорде ab , вдвое меньшей AB , но увеличьте вдвое новый рисунок так, чтобы хорда ab стала равной выбранному вами размеру AB . Теперь посмотрите на новую хорду $a'b'$. Ближе ли она к своей дуге? Заметим, что увеличение само по себе не изменяет относительных пропорций между хордой и ее дугой — оно не изменяет углы, а действует подобно увеличительному стеклу.

хорде. Математики предпочитают описывать этот предел так: $\lim (\text{дуга}/\text{хорда})=1$. Теперь мы хотим определить ускорение в *некоторый момент времени*, когда B и A практически совпадают. Мы не собираемся определять значение этой величины, усредненное по большому расстоянию. Мы хотим знать предел ускорения, когда B совпадает с A . Таким образом, мы говорим: дуга = хорда, $\widehat{AB} = \overline{AB}$.

Тогда

$$\frac{\text{Дуга}}{\Delta t} = \frac{\text{Хорда}}{\Delta t}, \quad \text{или} \quad \frac{\widehat{AB}}{\Delta t} = \frac{\overline{AB}}{\Delta t} \quad \text{в пределе.}$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} \text{Ускорение} &= \frac{\Delta v}{\Delta t} \\ &= \frac{v}{R} \cdot \frac{\widehat{AB}}{\Delta t} =, \quad \text{в пределе,} \quad \frac{v}{R} \cdot \frac{\overline{AB}}{\Delta t} \\ &= \frac{v}{R} \cdot (v), \end{aligned}$$

так как $\widehat{AB}/\Delta t$ есть v . Тогда ускорение

$$\begin{aligned} \frac{\Delta v}{\Delta t} &= \frac{v}{R} \cdot (v) \\ &= \frac{v^2}{R} \quad \text{или} \quad \frac{(\text{Скорость на орбите})^2}{(\text{Радиус орбиты})}. \end{aligned}$$

Это соотношение ускорение $= v^2/R$ очень важно. Мы будем использовать его в теории движения планет, при изучении движения электронов, при изготовлении масс-спектрографов и конструировании циклотронов — везде, где мы сталкиваемся с движением по орбите. Было бы очень важно повторить для себя вывод этого соотношения и поверить в его значение. Поняв, как это делается, вы можете сократить вывод, ограничившись коротким объяснением, двумя эскизами и несколькими алгебраическими выражениями.

Два важных вопроса

Полученный нами результат, $\text{ускорение} = v^2/R$, вызывает два вопроса:

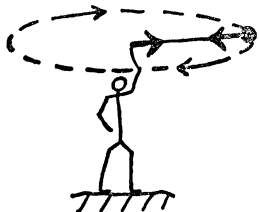
1. Каким образом может движущееся тело иметь ускорение, но не двигаться быстрее или же не перемещаться к центру круга?
2. Не нужна ли сила для ускорения тела в направлении его движения в соответствии с соотношением $F = M \cdot a$? Не действует ли на массу M , движущуюся по окружности, сила Mv^2/R ?

Оба эти вопроса являются выражением тех реальных трудностей, которые возникли сразу же, как только люди оказались перед

необходимостью объяснить движение планет по орбитам. Ответ на вопрос 2 следует из эксперимента: «Да, каждое реальное движение по окружности требует наличия реальной силы, направленной внутрь, а Mv^2/R есть величина этой силы». Чтобы тело могло двигаться по окружности, на него должна действовать сила, направленная к центру. Такая сила может осуществляться с помощью какого-либо реального внешнего воздействия — веревки, пружины или силы тяготения¹⁾.

Пример А

Вращайте камень, привязанный к веревке (фиг. 107). Вы тянете за веревку, а веревка тянет камень к центру. Веревка буксирует камень и сообщает ему некоторое количество



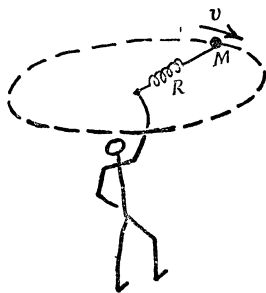
Фиг. 107. Вращение камня на веревке.

движения в новом направлении. Представим себе, что веревка делает серию слабых рывков: рывок — и скорость изменила свое направление, еще рывок — снова изменение, еще, еще и так вдоль всей окружности. Если вы отпустите веревку, рывки прекратятся, прекратится и изменение скорости, а камень будет *продолжать* двигаться по касательной. (Сказать, что «камень улетает по касательной» — значит ввести в заблуждение.)

¹⁾ Люди иногда думают, что движение по окружности *создает* направленную вовнутрь силу, необходимую для поддержания его. Ребенок, который хочет получить леденец, не думает, что от его желания появятся деньги на покупку леденца. Какой-то внешний агент в образе доброго дяди может обеспечить деньги для этой покупки, иначе леденца не будет. Условие движения по окружности аналогично по смыслу. Реальное внешнее воздействие должно обеспечить надлежащую силу, иначе не получится круговой орбиты.

Вращение камня на веревке по окружности, расположенной в горизонтальной плоскости, под действием пружины или веса обеспечивает наличие внутренней силы, которую можно измерить. Ниже описаны 3 опыта. Любой из них можно использовать для проверки справедливости соотношения $F = Mv^2/R$.

Опыт 1. Металлический шар, связанный шнуром со стальной пружиной, равномерно вращается по кругу (фиг. 108). Пружина растяги-



Фиг. 108.

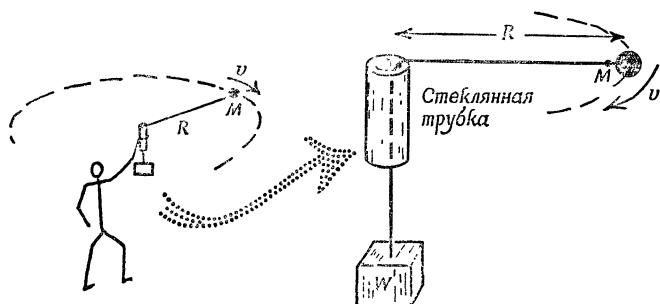
вается до некоторых пор, а затем длина R шнура + пружины остается постоянной во время вращения. Движение хронометрируется и затем рассчитывается величина силы

Mv^2/R , направленной внутрь. Эта сила, фактически действующая со стороны пружины, определяется в отдельном эксперименте путем навешивания нагрузки на пружину. Чтобы увидеть, насколько растянулась пружина при вращении, необходимо некоторое устройство.

Опыт 2. Металлический шар, привязанный к шнуру, равномерно

вращается по кругу, экспериментатор поддерживает движение шара по горизонтальному кругу. Движение хронометрируется, и определяется значение силы Mv^2/R , направленной внутрь.

Эта сила, фактически действующая на шар со стороны шнура, является силой натяжения и практически равна (за вычетом незначительного трения) весу груза W .



Фиг. 109.

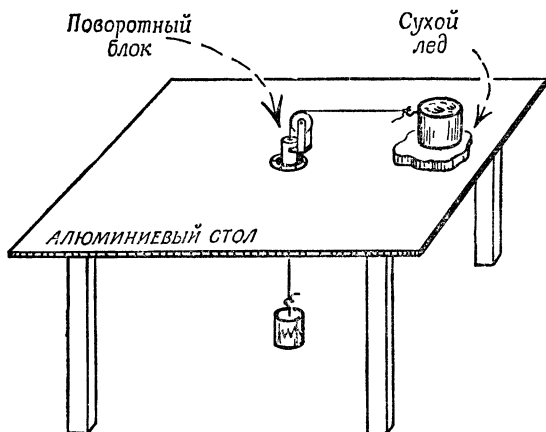
вращается по кругу (фиг. 109). Шнур спускается вниз в стеклянной трубке с гладкими открытыми концами и оттягивается с помощью груза W . Двигая трубку по малень-

Опыт 3. В этом варианте опыта 2, когда трения нет, шар заменен тяжелым блоком, расположенным на куске сухого льда, скользящем по алюминиевому столу (фиг. 110).

Шнур пропущен через отверстие в центре стола, а стеклянная трубка заменена маленьким блоком, который поворачивается в этом отверстии на очень хороших подшипниках.

Пример Б

Проследите за движением «конического маятника» (фиг. 111). Гиря маятника, движущаяся по окружности в горизонтальной плоскости, подвергается воздействию двух реальных сил — веса и натяжения веревки. Если вы изме-



Фиг. 110.

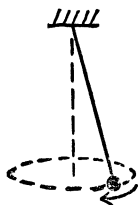
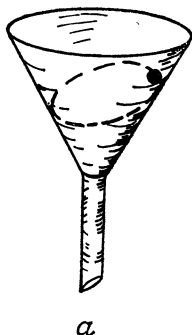
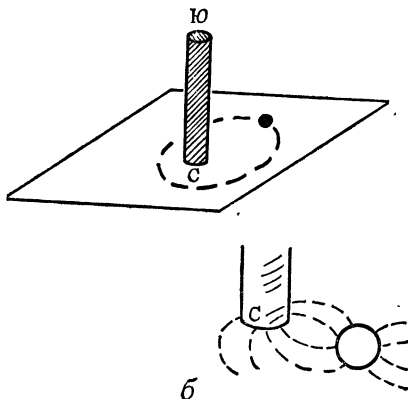


Рис. 111.

рите эти силы и сложите их как векторы, вы можете найти результирующую горизонтальную силу, направленную внутрь к центру орбиты гири. Измерив параметры орбиты и время одного оборота, вы можете проверить соотношение $a = v^2/R$.



а



б

Фиг. 112. Примеры кругового движения с центростремительной силой.

а — стальной шар в стеклянной воронке; б — стальной шар на гладком столе в поле магнита.

Пример В

Шарик катится внутри воронки по эллиптической орбите (фиг. 112, а).

Пример Г

Стальной шар катится по горизонтально расположенной стеклянной пластине в магнитном поле (фиг. 112, б). На практике обычно используется электромагнит, который располагается под столом. (Магнитное поле намагничивает шар так, что он притягивается к полюсу магнита. Получая подходящее ускорение, этот шар будет катиться вокруг полюса магнита.)

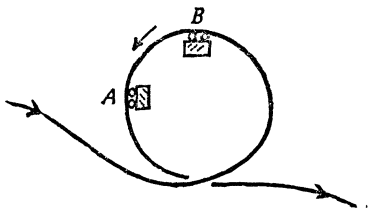
Пример Д

Движение Луны и планет.

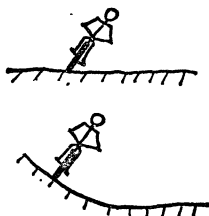
Задача 2

Предположим, что тело, движущееся по окружности, должно увлекаться к центру реальной силой (вызванной действием такого реального агента, как веревка, пружина, дорога). Для каждого из перечисленных ниже случаев назовите воздействие, которое обеспечивает появление необходимой силы. (Первый ответ приводится в качестве образца.)

1. Камень, вращающийся на веревке в горизонтальной плоскости. (Ответ: «Натяжение веревки» или «Его тянет веревка».)
2. а) Тележка на крутом повороте.
 б) Тележка, в точке А совершающая мертвую петлю (фиг. 113).
 в) Тележка, в точке В совершающая мертвую петлю (фиг. 113).



Фиг. 113. К задаче 2.



Фиг. 114. К задаче 2.

3. а) Велосипедист делает крутой поворот на ровном участке дороги (фиг. 114).
 б) Велосипедист делает крутой поворот на наклонном участке пути (фиг. 114).
4. Самолет в вираже.
5. Отрицательно заряженный электрон, движущийся в атоме вокруг положительно заряженного ядра.

Ускорение без изменения скорости

На заданный ранее вопрос 2 дает ответ эксперимент: движение по окружности требует направленной внутрь силы величиной Mv^2/R . А теперь снова вернемся к вопросу: почему тело с ускорением, направленным к центру круга, не движется быстрее и не перемещается ближе к центру? Это все еще остается непонятным, хотя теперь начинает казаться, что дело тут скорее в формулировке, нежели в физической сущности явления. Факты очевидны: движение по окружности существует, и для его поддержания необходимы силы, направленные внутрь. Под действием этих сил происходит изменение количества движения, в результате чего траектория тела искривляется, изменяя направление скорости, но не меняя ее величины. Если мы хотим включить такие изменения скорости в определение ускорения $a = \Delta v / \Delta t$, то следует считать, что при движении по окружности ускорение действительно имеет место. Если же мы ограничимся прежним определением

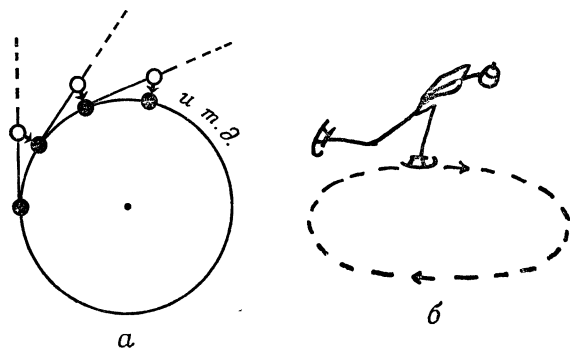
«ускорения» — «движущийся все быстрее и быстрее», тогда равномерное движение по кругу может и не сопровождаться «ускорением». Если мы станем на такую точку зрения, то должны будем ввести новую категорию сил в дополнение к тем, которые определяются соотношением

$$\text{«СТАРАЯ» СИЛА} = \text{МАССА} \cdot \text{СКОРОСТЬ ВСЕ УБЫСТРАЮЩЕГОСЯ ДВИЖЕНИЯ.}$$

Для новых сил верно другое соотношение:

$$\text{«НОВАЯ» СИЛА} = \frac{\text{МАССА} \cdot (\text{СКОРОСТЬ})^2}{\text{РАДИУС}}.$$

Как следует из эксперимента, эти новые силы могут быть реальными силами, которые должны обеспечить движение тела по окружности. Однако во избежание хлопот мы не станем вводить такого



Фиг. 115.

ограничения, а будем применять термин «ускорение» для *всех* видов $\Delta v/\Delta t$, ибо из опыта ¹⁾ следует, что во всех случаях соотношение $F=M \cdot a$ характеризует результирующую силу. Исходя из этого мы должны произвести две серии проверок соотношения $F=M \cdot a$; одна из них связана с рассмотрением прямолинейного движения, а другая — с телами, движущимися по окружности.

¹⁾ По сути дела, именно это имел в виду Галилей, утверждая, что горизонтальная и вертикальная проекции движения снаряда не зависят друг от друга. В вершине рассматриваемой параболы вертикальное ускорение перпендикулярно направлению движения и требует реальной силы, направленной вертикально.

Двигаясь по окружности, тело устремляется *внутрь* к центру, в противном случае оно продолжало бы двигаться по касательной; уходя немного по касательной, тело притягивается к центру, и так оно движется, непрерывно стремясь внутрь, но не попадая в центр. Если такая ситуация вам кажется парадоксальной, то понаблюдайте за конькобежцем, выписывающим небольшие круги на льду, — он все время как бы падает, наклонившись вперед (фиг. 115).

На вопрос 1 следует ответить так: *ускорение перпендикулярно направлению движения* и поэтому не увеличивает скорости в этом направлении. Добавляясь к нулевой скорости, это ускорение увлекает тело по орбите постоянного радиуса.

Центростремительная или центробежная сила?

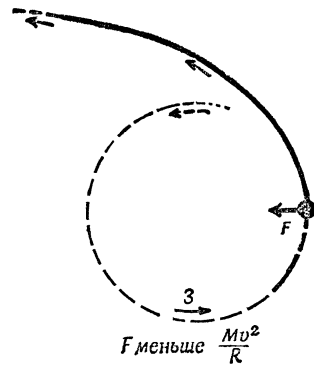
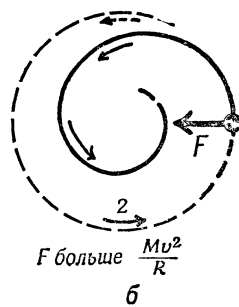
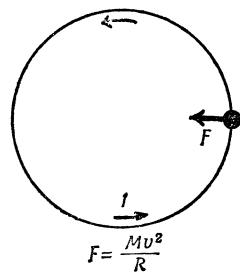
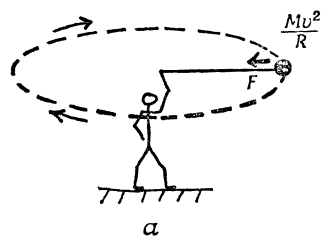
Сила, которая тянет тело к центру орбиты, изменяя лишь *направление* скорости, называется *центростремительной*. В противоположность этому сила, которая приводит к тому, что тело удаляется от центра, называется *центробежной*. Вы часто слышите эти названия, но, к сожалению, этот термин вводит в заблуждение, когда его применяют к движущимся телам. Конечно, существует направленная наружу центробежная сила, действующая на «партнера», расположенного в центре, например на человека, который держит веревку с вращающимся на ней камнем. Такой подход вносит путаницу в определение силы, действующей на движущееся тело. Поэтому термина «центробежная сила» лучше избегать. Однако, поскольку он широко распространен, особенно среди инженеров, мы должны будем вернуться к нему позднее и вкратце обсудить его значение.

Центростремительная сила. Mv^2/R

Если масса M движется по окружности с радиусом R с постоянной скоростью v , то должно существовать реальное воздействие, обеспечивающее необходимую силу, равную Mv^2/R (фиг. 116, а). Если результирующая реальных сил, действующих на M , больше Mv^2/R , то скорость тела будет увеличиваться в направлении к центру и оно будет двигаться по свертывающейся спирали. Если действующие силы слишком малы, то траектория будет представлять собой раскручивающуюся спираль (фиг. 116, б). Существует много механических систем, в которых, как показано в приводимых ниже примерах, эта сила соответствует необходимой величине.

Теперь мы подробно рассмотрим некоторые примеры движения по окружности — от камня на веревке до современной центрифуги.

Камень вращается на веревке. Веревка растягивается до тех пор, пока ее натяжение не станет равным силе Mv^2/R , тянущей внутрь.

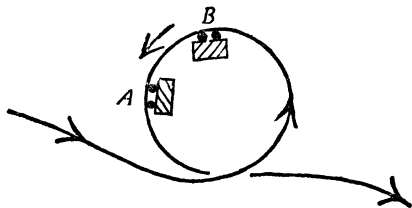


Фиг. 116, Движение по окружности,

Тележка в «мертвой петле». На тележку действует сила тяжести и сила со стороны рельсов. Если пренебречь трением, то можно считать, что сила, действующая со стороны рельсов, направлена перпендикулярно им. Продолжите это обсуждение, отвечая на вопросы задачи 3.

Задача 3

Предположим, что тележка выполняет мертвую петлю, как это показано на фиг. 117. Чтобы тележка двигалась по окружности, в точке А должна действовать некоторая сила.



Фиг. 117. К задаче 3.

- Какое направление должна иметь эта сила?*
- Что обеспечивает эту силу?*
- Какая другая сила (силы) должна действовать в точке А на тележку?*
- Какое влияние должна оказывать эта другая сила (силы) на движение тележки?*

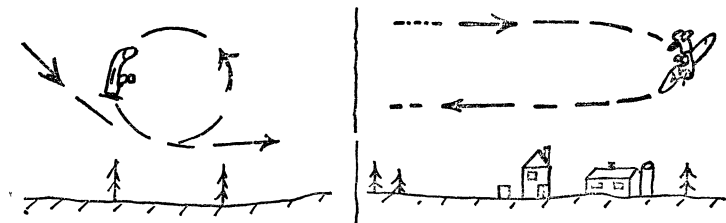
[З а м е ч а н и е. Отвечая на вопрос (г), забудьте про силы, о которых говорилось в вопросах (а) и (б). Это — реальная сила, и она должна присутствовать. Она играет особую роль. Здесь не имеет смысла заниматься сложением векторов, чтобы получить результирующую силу.]

Для движения тележки по окружности необходимо, чтобы в точке В была приложена сила.

- Какое направление должна иметь эта сила в точке В?*
- Как обеспечивается наличие такой силы?*
- Если тележка движется значительно медленнее, то потребуется много меньшая сила. Почему?*
- Почему сила в точке В может оказаться слишком большой? Что произойдет, если эта сила будет слишком велика?*

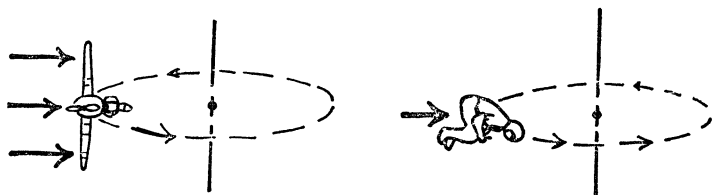
Езда на велосипеде. Когда велосипедист движется по горизонтальному кругу, реальное воздействие должно обеспечить внутреннюю, центростремительную силу. На неровной дороге таким воздействием будет трение; оно обеспечивает горизонтальную силу, которая толкает шины в сторону. (На ледяной дорожке трение практически отсутствует и велосипедист не сможет сделать поворот, он будет проскальзывать вперед, считая, что вопреки желанию скользит в противоположную сторону.) При повороте велосипедист наклоняется вбок. Наклон сам по себе не увеличивает силы трения, но он необходим, ибо иначе сила, действующая на колеса со стороны дороги, опрокинет велосипедиста. Если он вместо прямой дороги движется по наклонному треку, то нет больше необходимости в боковой силе трения: наклонный трек отталкивает велосипедиста от своей поверхности с силой, которая имеет вертикальную компоненту, уравновешивающую его вес, и горизонтальную компоненту, которая обеспечивает необходимую центростремительную силу.

Самолеты. Пилот, совершая разворот, должен наклонить машину таким образом, чтобы давление воздуха толкало ее по направлению к центру круговой орбиты. При повороте «подъемная сила» должна быть намного больше



Фиг. 118. Самолет делает мертвую петлю.

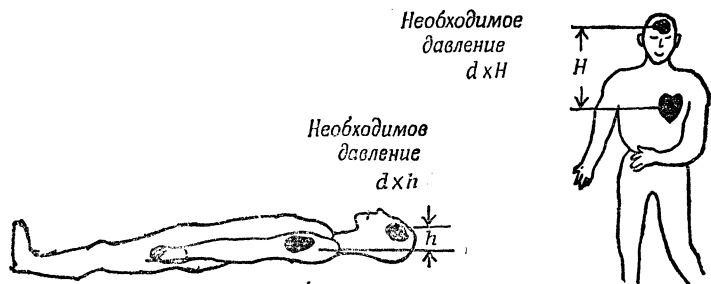
(это обеспечивается элеронами ¹⁾), чем во время устойчивого горизонтального полета, когда она как раз уравнивает вес самолета. Сам пилот тоже должен двигаться по кривой, и ему тоже необходимо некоторое направленное к центру давление. В наклоненном самолете на пилота с необходимой силой



Фиг. 119. Силы воздушного давления на крылья и корпус толкают самолет по направлению к центру круга в петле и при повороте.

действует его кресло. А что же происходит с циркуляцией крови к голове пилота (направленной к центру виража)? Кровь должна не только участвовать в развороте, но и циркулировать от сердца к голове. Сердце должно нагнетать кровь с большим усилием, чтобы обеспечить достаточное питание мозгу, в противном случае кровь не достигнет мозга и пилот потеряет сознание или временно ослепнет. В нормальном состоянии, когда вы стоите неподвижно, ваше сердце прокачивает m килограммов крови вверх с силой $(m \cdot 9,8)$ ньютонов, чтобы обеспечить циркуляцию крови. Если самолет летит быстро (велика v) по кривой с малым R , сила, необходимая для прокачивания крови от сердца к голове, $m(v^2/R)$, может во много раз превысить $(m \cdot 9,8)$. Сердце пилота может оказаться неспособным обеспечить эту силу mv^2/R , и тогда возможна временная слепота. Если вы ложитесь, а не стоите, нагрузка на сердце уменьшается. Если пилот не сидит в таком положении, чтобы его голова была направлена к центру кривизны его траектории, а ложится вдоль этой кривой, он может не терять сознания гораздо дольше. На фиг. 121 показаны результаты

¹⁾ Сила тяжести не играет особой роли при развороте и здесь не учитывается.



Фиг. 120. Когда человек находится в покое, стоит или лежит, сердце должно обеспечить приток крови к мозгу.

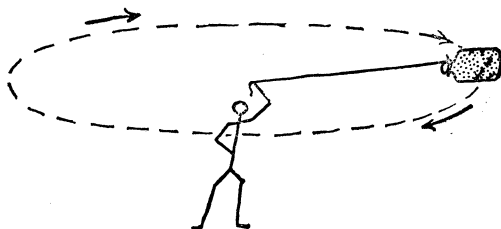
← Направление полета		Безопасное ускорение, единицы g	Продолжительность ускорения
	↑ Направление ускорения к центру круга ↓	2 4 g	3 или 4 сек
		2 4 6 g	3 или 4 сек
		2 4 6 g	3 или 4 сек
		2 4 6 8 10 12 14 g	до 3 мин
		2 4 6 8 10 12 g	до 3 мин

Фиг. 121. Влияние положения на допустимое ускорение.

некоторых опытов. Центробежное ускорение самолета v^2/R выражено в единицах g .

Электроны в атомах. В одной из последующих глав мы рассмотрим строение атома, считая, что электроны вращаются по орбитам вокруг ядра. Мы предполагаем, что законы Ньютона применимы и в данном случае и что сила mv^2/R обеспечивается электрическим притяжением.

Молочные сепараторы и центрифуги. Если вращать по кругу привязанный к веревке сосуд с жидкостью (фиг. 122), то к каждому участку жидкости будет

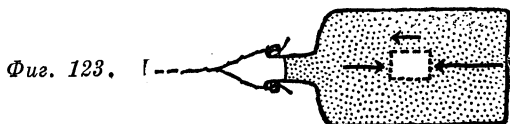


Фиг. 122.

приложена центростремительная сила mv^2/R , ибо в противном случае сосуд не мог бы двигаться по круговой орбите. В каждом случае направленная во-внутрь сила равна

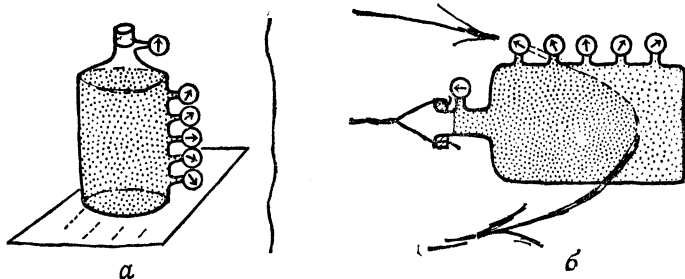
$$(\text{ПЛОЩАДЬ}) \cdot \left(\frac{\text{ДАВЛЕНИЕ}}{\text{НА НАРУЖНОМ КОНЦЕ}} \right) - (\text{ПЛОЩАДЬ}) \cdot \left(\frac{\text{ДАВЛЕНИЕ}}{\text{НА ВНУТРЕННЕМ КОНЦЕ}} \right).$$

Эти давления зависят от радиусов и скоростей, но не от содержания образца. Поэтому сила, создаваемая внешним воздействием, одинакова во всех случаях (для данного объема), но сила, необходимая для поддержания кругового движения, зависит от плотности образца, и как следствие — разделяющее действие. Некоторый участок объема жидкости (фиг. 123) движется по окружности



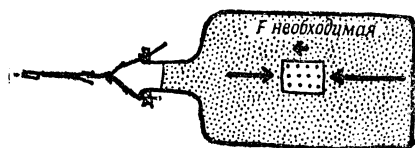
Фиг. 123.

и поэтому требует направленной внутрь результирующей силы для удержания его на круговой орбите. Такая сила должна быть обеспечена разностью давлений жидкости на его концах. Давление на внешний конец участка жидкости должно быть больше давления на его внутренний конец. Таким образом,

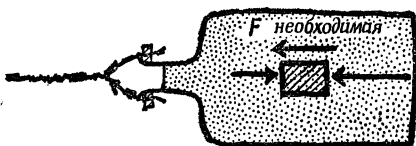


Фиг. 124.

имеется постепенное увеличение давления по мере приближения ко дну сосуда, весьма похожее на обусловленный силой тяжести вертикальный перепад давления в стоящем сосуде. Однако в быстро вращающемся сосуде давление



Фиг. 125.

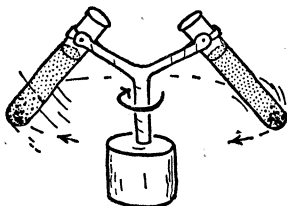


Фиг. 126.

может быть намного больше. Пузырек воздуха или нечто легче жидкости будет испытывать это давление, но при очень малом m и mv^2/R будет очень мало. Легкое тело получило бы ускорение и увлеклось бы вовнутрь (к оси вращения). Сначала по мере движения вовнутрь тело будет двигаться ускоренно, пока не достигнет скорости, при которой внутреннее трение в жидкости в точности уравновесит дополнительную силу. Тогда

СИЛА, НАПРАВЛЕННАЯ — СИЛА, НАПРАВЛЕННАЯ — ТОРМОЖЕНИЕ БЛАГОДАРЯ		
ВОВНУТРЬ	ВОВНЕ	ВНУТРЕННЕМУ ТРЕНИЮ =
из-за большего давления на внешнем конце	из-за меньшего давления на внутреннем конце	из-за движения в жидкости вовнутрь
= РЕЗУЛЬТИРУЮЩАЯ СИЛА,		
направленная вовнутрь,		
равна требуемой силе		
mv^2/R .		

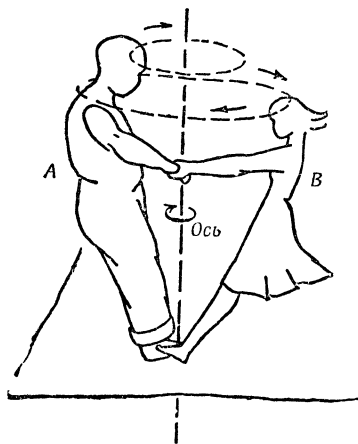
Именно так получают сливки во вращающемся молочном сепараторе. На более плотные частицы, например на песчинки в мутной воде, действует такая же внутренняя сила, обусловленная давлением. Но для их удержания на круговой орбите требуется гораздо большая сила, нежели в случае пузырька воздуха; таким образом, песчинки будут двигаться по раскручивающейся спирали и попадут во внешнюю часть сосуда. Возьмем теперь сосуд с мутной водой, содержащей пузырьки воздуха. Если поставить ее на стол, муть будет оседать, а пузырьки воздуха из-за трения в жидкости медленно и равномерно двигаться



Фиг. 127. Центрифуга.

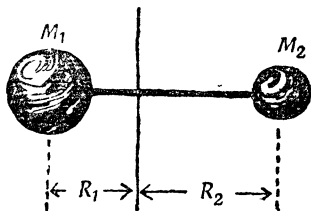
вверх. Если вращать этот сосуд на веревке, то муть будет осаждаться, а пузырьки подниматься гораздо быстрее. Такие центрифуги позволяют ускорять осаждение тонких взвесей и даже разделять в воде крупные белковые молекулы,

Венский вальс. Танцующая пара вращается вокруг общей оси, держась друг за друга (на одном или на обоих каблуках, фиг. 128). Партнеры тянут друг друга вовнутрь; эта тяга обеспечивает необходимые центростремительные силы. Даже если масса партнера *A* больше массы партнера *B*, натяжения одинаковы и противоположно направлены (третий закон Ньютона). Эта «система» так подбирает радиус своей орбиты, чтобы силы уравнивались. В результате партнеры вращаются вокруг оси, проходящей через их



Фиг. 128.

общий центр тяжести. А теперь найдем алгебраическое выражение для такого танцевального вращения (фиг. 129). Предположим, что *A* и *B* имеют массы M_1 и M_2 и вращаются вокруг общей оси по окружности с радиусами R_1 и R_2 со скоростями v_1 и v_2 . Оба совершают один оборот за время T . Тогда $v_1 = 2\pi R_1/T$ и $v_2 = 2\pi R_2/T$ (т. е.



Фиг. 129.

$v_1/v_2 = R_1/R_2$, хотя это и не необходимо). Обе центростремительные силы должны быть равны и противоположны друг другу, так как они обусловлены действием и противодействием танцоров. Таким образом,

$$\frac{M_1 v_1^2}{R_1} = \frac{M_2 v_2^2}{R_2},$$

или

$$\frac{M_1 (2\pi R_1/T)^2}{R_1} = \frac{M_2 (2\pi R_2/T)^2}{R_2},$$

т. е. $M_1 R_1 = M_2 R_2$ [сокращая $(2\pi)^2$, T^2 и т. д.]. Тогда произведение (масса) · (расстояние от оси вращения) будет одинаково для обоих партнеров. Поэтому более тяжелый партнер располагается на меньшем расстоянии от оси. Если вы посмотрите, что сказано о нахождении положения центра тяжести двух тел в пособиях по физике, то найдете, что если R_1 и R_2 измерять от оси, проходящей через центр тяжести M_1 и M_2 , то $M_1 R_1$ должно быть равно $M_2 R_2$ в соответствии со свойствами центров тяжести. Тогда для вращающихся систем $M_1 R_1 = M_2 R_2$. Именно поэтому танцующая вальс пара должна вращаться вокруг ее центра тяжести.

Подобное рассмотрение правильно описывает танцы с точки зрения физики, но вряд ли это практически полезно. Оно верно и в случае движения

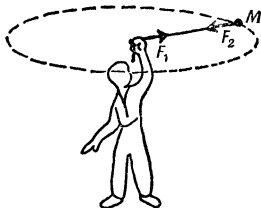
Луны и Земли и важно для понимания природы приливов. Астрономы используют его при рассмотрении движения двойных звезд. Вы встретите и другие примеры проявления центростремительной силы в астрономии и атомной физике.

Центробежная сила и средство от головной боли для инженеров

Движение по окружности требует реальной силы, направленной вовнутрь и производимой реальными внешними воздействиями. Представление о центростремительной силе поможет вам разобраться во всех проблемах, связанных с круговым движением. А вот что такое центробежная сила? Вы часто слышите это слово, даже сами его произносите, когда вам приходится вращать что-либо по кругу, вы найдете этот термин во многих книгах по физике. Существует множество мнений о том, что такое центробежная сила. Вы можете выбрать из них то, которое вам больше по вкусу.

МНЕНИЕ 1: *Центробежная сила — это ложная сила, представление о которой возникло на основе неправильного толкования запутанного взаимоотношения между воздействием, определяющим силу, и объектом приложения этой силы.*

Если вы вращаете камень на веревке, ее натяжение тянет вашу руку наружу с той же силой, с какой тянет и камень внутрь. Это — настоящая центро-

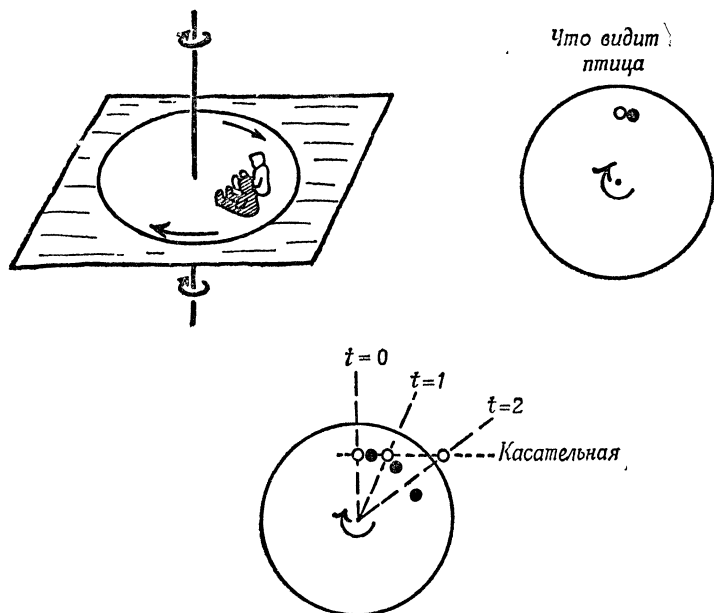


Фиг. 130. Центробежная сила?

бежная сила, действующая на вашу руку, но не на вращающийся камень. Вы ощущаете, что вашу руку что-то тянет наружу и говорите: «Я чувствую, что камень и веревка оттягивают мне руку. Это свидетельствует о том, что центробежная сила тянет камень и веревка передает действие этой силы». Вот тут вы и ошиблись. Не существует никакой силы, действующей на камень. На самом деле веревка, оттягивая вашу руку наружу, в то же время тянет камень вовнутрь. Существует лишь одна действительная сила — центростремительная, тянущая камень вовнутрь.

Представьте себе, что вы собрались посетить аттракцион в парке и покататься на вращающемся полу. Вы и ваш спутник входите в помещение и садитесь на неподвижный полированный пол. Зная, в чем суть представления, вы прижимаетесь крепче к полу. Когда пол начнет вращаться, вам покажется, будто какая-то неведомая сила отбрасывает вас от центра, и если бы не сцепление с полом, под действием этой силы вы стали бы скользить к ограждению.

Ваш спутник тоже заскользит к краю, если вы не удержите его, подтягивая к центру. Вы оба будете чувствовать, что боретесь с «центробежной силой». Но предположим теперь, что на вас смотрит неподвижный наблюдатель. Если смотреть на вращающуюся комнату извне, то будет казаться, что вы оба движетесь по круговой орбите и для удержания вас на этой орбите необходимы *реальные* силы. Для вашего товарища это будет сила, действующая с ва-



Фиг. 131.

шей стороны и направленная вовнутрь, а для вас — это сила сцепления с полом. Повторим еще раз: вы просто воображаете, что существует некая сила, действующая извне на вашего товарища, поскольку вы уже приложили к нему реальную силу. С точки зрения постороннего наблюдателя эта внутренняя сила вовсе не компенсируется какой-то таинственной внешней силой; именно внутренняя сила и обеспечивает ускорение вовнутрь и определяет ваше движение по кривой. Если вы отпустите вашего спутника, он при отсутствии трения будет двигаться по касательной. Его последовательные положения на касательной будут лежать все дальше и дальше от центра круга, так что вам, поскольку вы вращаетесь вместе с полом, *будет казаться*, что ваш товарищ скользит вдоль радиуса. На самом же деле он *продолжает двигаться по прямой* (по касательной) — это простой пример, иллюстрирующий первый закон Ньютона.

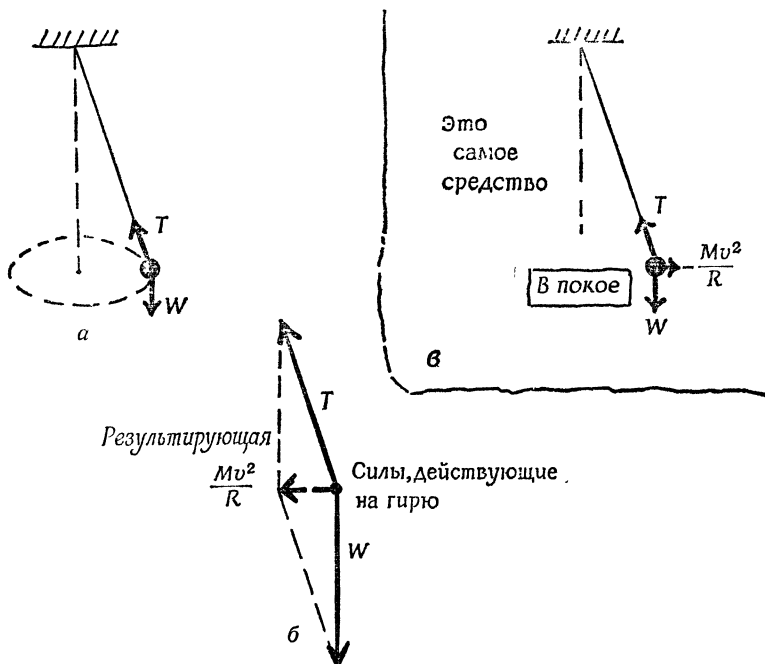
МНЕНИЕ II: *Центробежная сила — заблуждение, проистекающее от того, что мы существуем во вращающейся системе, но пытаемся забыть об этом.*

Из приведенного случая с вращающимся полом можно сделать следующий вывод. Для человека, сидящего на столе и не знающего, что он движется, существует внешнее силовое поле, наделяющее каждую массу M внешней силой Mv^2/R . Независимо от того, существует ли реальное внешнее воздействие, прилагающее силу, направленную вовнутрь для уравнивания силы, направленной вовне, будет казаться, что любое тело, предоставленное самому себе, скользит наружу с ускорением v^2/R . Становясь на точку зрения постороннего наблюдателя, следует считать и силовое поле, и скольжение наружу лишь кажущимися и обусловленными тем, что, пребывая во вращающейся системе, мы тем не менее забываем принимать в расчет ее движение.

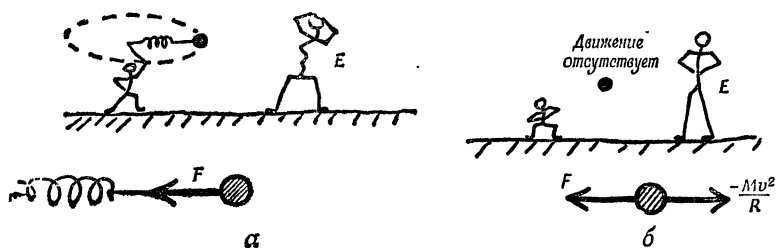
МНЕНИЕ III: *Средство от головной боли для инженеров.*

Это прекрасное применение центробежной силы. Давайте строго отнесемся к слабо подготовленному молодому инженеру, который предпочитает статику — физику покоя (или равновесия) динамике, т. е. физике движения. Задачи, включающие ускорение и вращение, вызывают у него головную боль, и он хочет свести эти задачи к простым статическим силам, которые действуют в конструкциях мостов и подъемных кранов и в которых он хорошо разбирается. Это действительно можно сделать. Рассмотрим задачу о вращении конического маятника (фиг. 132). На груз маятника действуют две реальные силы: его вес и сила натяжения веревки. Эти две реальные силы складываются и дают результирующую силу, направленную вовнутрь, Mv^2/R , в противном случае груз не смог бы продолжать движение по круговой орбите. Значит, имеются две силы W и T , которые дают направленную вовнутрь горизонтальную результирующую силу Mv^2/R . Превратим эту задачу в статическую (т. е. в задачу с нулевой результирующей силой) путем добавления некоторой дополнительной фиктивной силы. Какую *фиктивную силу нужно добавить к W и T* , чтобы *результирующая сила обратилась в нуль*? Эта сила должна быть равна — Mv^2/R , или силе Mv^2/R , направленной *наружу*. Некоторые профессора могут сказать этому инженеру: «Да, вы можете обратить любую задачу с круговым движением в статическую, если ко всем реальным силам добавите некую фиктивную центробежную силу Mv^2/R и напишете уравнение, тождественное, что все силы (включая фиктивную) дают в сумме нуль. Решение этого уравнения дает вам ту же самую информацию, что и метод, учитывающий только реальные силы, которые создают направленное вовнутрь ускорение, v^2/R ».

При таком подходе центробежная сила, несмотря на то что она фиктивна, тем не менее вполне пригодна для лечения головной боли у инженеров. Точно так же в качестве средства спасения от трудностей она используется в современной физике, но в этом случае это лишь полезный искусственный прием. Такой подход, которым пользуется большинство студентов, дает правильный ответ, но теория становится более трудной для понимания. В самом деле, ведь при этом реально существующее движение сводится к фиктивному покою. Тот, кто, введенный в заблуждение правильным ответом, отнесется с доверием к такому приему, будет чувствовать себя неуверенно, не зная, какая из этих сил реальна и как она действует. Если вы стремитесь к настоящему пониманию физики, то любой ценой избегайте этого лекарства от головной боли. И уж, конечно, не смешивайте это «центробежное-лекарство-от-головной-боли» с центростремительными силами, иначе получится чепуха!



Фиг. 132.



Фиг. 133.

МНЕНИЕ IV: *Относительность.*

Это мнение представляет собой несколько замечаний к очень извращенной теории относительности. Прочтите этот абзац для развлечения или сочтите его за некое предупреждение, но не превращайте его в нечто, похожее на средство от головной боли у инженеров. Взгляды, связанные с представлением об относительности движения, правильны, но только в системе определений, специально для этого сформулированных.

Разве нельзя сказать что-либо более положительное о центробежной силе? Некоторые ученые (см. мнение II) спрашивают: «Почему нехорошо наблюдать за предметами из вращающейся системы координат? Ведь в конце концов мы живем на вращающейся Земле. Действительно ли «центробежные силы», возникающие из представлений, связанных с нашей вращающейся системой, отличаются от других сил, и так ли они нереальны? Разве можем мы быть уверены в том, что происходит на самом деле — вращаемся мы или кто-нибудь другой?» (Здесь мы вновь возвращаемся к временам Коперника и Птолемея.) Этот последний вопрос напоминает задачу с ускоряющимся железнодорожным вагоном, на примере которого проверялись законы Ньютона. Соорудив наклоненную комнату в таком вагоне, мы все же нашли бы те же самые законы: «тяготение», изменяющееся по величине и направлению. Мы догадываемся о том, что *не можем* обнаружить различия между эффектами, вызванными ускорением и силой тяжести. Эйнштейн построил общую теорию относительности на основе детального рассмотрения невозможности установить это различие.

Теория относительности начинается с заявления, представляющего собой аксиому и состоящего в том, что мы не можем сказать, кто именно движется — мы сами или «кто-то другой», что не существует такого понятия, как *абсолютное* движение. Если это так, то выражение «абсолютное пространство» бессмысленно; оно не необходимо и не должно употребляться в науке. В таком случае рабочей геометрией «пространства» должна быть такая геометрия, с помощью которой мы могли бы открыть те же самые физические законы независимо от того, что мы думаем о нашем движении, т. е. движемся ли мы или кто-либо другой. Что заставляет нас видоизменять ту простую геометрию пространства и движения, которую предложил Евклид и которой пользовались Галилей и Ньютон? Было сделано много неудачных попыток для выделения абсолютного движения (в случае постоянных скоростей), даже с помощью световых сигналов; поэтому мы чувствуем, что вправе принять принцип относительности и его видоизмененную геометрию. В практической жизни эти видоизменения незаметны. Они начинают играть роль лишь при очень больших скоростях, например в астрономии и в атомной физике. Распространяя принцип относительности на случай ускоренного движения, мы полагаем, что расположенный в определенном месте наблюдатель не сможет установить различия между эффектами, связанными с ускорением, и изменением силы тяжести в данном месте; таким образом, мы приходим к выводу, что гравитационные поля могут рассматриваться в качестве местных (локальных) изменений геометрии пространства-времени. Это и есть принцип эквивалентности Эйнштейна. Хотя такой подход является совершенно новым, практически он дает малые отклонения от закона всемирного тяготения Ньютона.

Распространяя эту идею на случай вращения, мы предполагаем, что локальный наблюдатель не может заметить различия между эффектами, связанными с вращением системы координат, и локальным изменением силы тяжести, если он движется вместе с системой. В этом случае тянущая наружу центробежная сила будет представляться ему (находящемуся на вращающем-

ся полу) вполне реальной, дополнительной горизонтально направленной силой тяги, или силой тяжести. Для жука, помещенного в центрифугу, центробежная сила будет проявляться в качестве реального поля силы тяжести, только в тысячи раз более сильного, нежели обычная сила тяжести. Для жука сила тяжести будет направлена иначе — он забудет о ее прежнем направлении — и будет неизмеримо больше. Принципы общей теории относительности оказались очень полезными для координации мышления, и за все время не наблюдалось каких-либо противоречащих им явлений. С этой точки зрения центробежная сила вполне приемлема. Если мы хотим проверить эффекты, связанные с большими гравитационными полями, недостижимыми в условиях притяжения Земли, то можем воспользоваться центрифугой.

Общий принцип эквивалентности запрещает нам называть те виды движения, в которых участвует Земля, абсолютными и заставляет использовать новую механику и геометрию, с помощью которых можно предсказать одни и те же эффекты независимо от того, вращается ли Земля вокруг Солнца или же звезды и Солнце вращаются вокруг Земли. Согласно общей теории относительности, вращающаяся Вселенная будет порождать «центробежные силы» на неподвижной Земле, так что невозможно выяснить (с помощью маятника Фуко или изменения величины g с широтой), вращается ли Земля или вращается то, что ее окружает. Поэтому, возвращаясь к старому вопросу: «Кто прав — Коперник или Птолемей?», мы должны в отличие от Галилея сказать: «Обе точки зрения допустимы, хотя одна из них представляет собой более простое описание явлений, пригодное для практического мышления и работы». Пред нами пример гегелевской идеи развития: тезис — антитезис — синтез.

А ваше мнение об этих четырех случаях?

Сделайте сами выбор. Однако при разборе задач и экспериментов, приведенных в этой книге, советуем пользоваться только *центростремительными* силами.

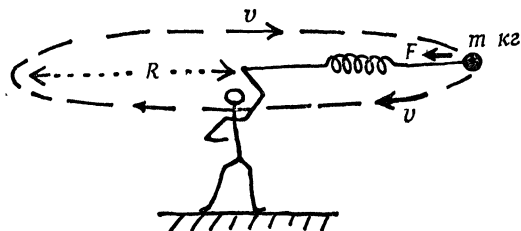
ЛАБОРАТОРНЫЙ ОПЫТ

Опыт 4. Простая проверка соотношения «Необходимая сила» $= Mv^2/R$. Вместо сложного устройства, которое можно приобрести вместе с инструкцией типа поваренной книги, где даются рецепты студентам, как «проверить этот закон», мы предлагаем некое приспособление, предназначенное для грубой, но наглядной проверки. Попробуйте провести эту проверку с помощью партнера. Если измерения и расчеты не ясны, обратитесь к здравому смыслу и обдумайте все, прежде чем просить о помощи. Сначала внимательно выслушайте воображаемый расчет прибора, который начинает изобретать исследовательская

группа, состоящая из следующих лиц: руководитель *Сагредо*, главный экспериментатор *Сальвиати* и его ассистент и критик *Симплицио*. (Этот прибор был разработан в результате ряда обсуждений с использованием промежуточных экспериментов, в которых проверялась пригодность предлагаемых конструкций.)

САГРЕДО. Мы хотим проверить предсказание о том, что движение по кругу требует некоторой силы, направленной вовнутрь и определяемой соотношением $F = Mv^2/R$. Мы предлагаем крутить на веревке камень и измерять ту реальную силу, с помощью которой мы удерживаем

камень на орбите. Затем мы сравним эту силу с той, которая предсказывается соотношениями $a=v^2/R$ и $F=Ma$,



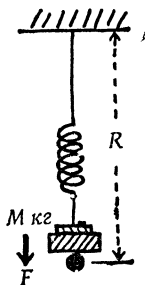
Фиг. 134.

СИМПЛИЧИО. Нам необходима очень сложная аппаратура; измеритель скорости v ...

САЛЬВИАТИ. Вздор. Просто измерьте время одного оборота. Тогда v будет равно длине окружности $2\pi R$, деленной на это время.

СИМПЛИЧИО... и сложный прибор для измерения силы.

СИМПЛИЧИО. Это верно. Я знаю, что пружины подчиняются закону Гука, а законы абсолютно правильны.



САГРЕДО. Простак! Если так слепо доверять законам, то вы должны помнить об их ограниченности. Знаете ли вы, что пружины могут растягиваться больше, чем это следует из закона Гука?

СИМПЛИЧИО. Мы можем остановить растяжение пружины, связывая ее концы длинной нитью.



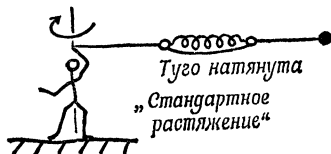
Фиг. 135

САГРЕДО. Неверно. Ведь мы хотим выполнить совсем простую проверку.

САЛЬВИАТИ. Используйте для измерения натяжения веревки пружину. Позже мы сможем определить эту силу, подвешивая пружину и нагружая ее до тех пор, пока растяжение не станет таким же, как при вращении. Мы знаем, что хорошая стальная пружина надежна.

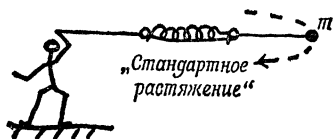
САГРЕДО. О, прекрасно! И тогда, когда эта нить будет свободна, она не нужна; а когда ее натянут туго, она испортит наш эксперимент, внося дополнительное натяжение; так мы и не будем знать истинного натяжения.

САЛЬВИАТИ. Я думаю, что мы все же можем использовать предложение Симпличио. Нам как раз нужно знать, как сильно растяги-



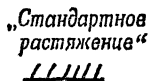
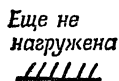
Фиг. 136.

вается эта пружина во время вращения, чтобы потом, нагружая ее, мы могли довести ее до такого же растяжения. Если мы соединим концы пружины нитью, как это предложил Симпличио, мы будем вращать ка-



Фиг. 137.

СИМПЛИЧИО. Я понимаю смысл предложения о стандартном растяжении; но если при этом пружина натянется до предела, вновь будет в силе ваше возражение против предложенной мной нити — сила, добав-



Фиг. 138.

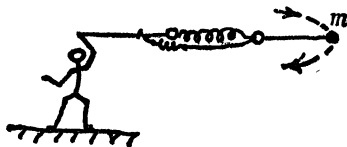
мень все быстрее и быстрее до тех пор, пока нить не окажется натянутой. Это мы можем назвать «стандартным растяжением».

СИМПЛИЧИО. Ну ладно, так мы найдем массу и скорость, но как

ляемая пружиной, будет неизвестна.

САЛЬВИАТИ. Почти до предела.

СИМПЛИЧИО. Я не понимаю, как мы определим, что пружина натянута почти до предела.



Фиг. 139.

мы измерим R ? Удержим ли мы линейку около вращающейся пружины?

САЛЬВИАТИ. Можно измерить R позже, когда пружина будет подвешена вертикально и нагружена до стандартного растяжения.

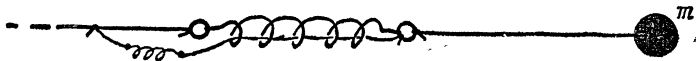
САЛЬВИАТИ. Давайте тогда используем другую, маленькую пружинку, привязанную к нити. Эта маленькая пружинка остается в нерастяннутом состоянии, пока большая пружина не натянется туго.

СИМПЛИЧИО. Нужно ли измерять и натяжение маленькой пружинки?

САЛЬВИАТИ. Нет; маленькая пружинка служит только индикато-

Свяжите концы этой маленькой пружинки нитью.

САГРЕДО. Хорошо. Тогда мы сможем крутить все быстрее и быстрее, пока не заметим, что маленькая



Фиг. 140.

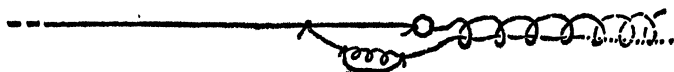
ром. Она не будет тянуть до тех пор, пока не начнет растягиваться, а натяжение ее будет столь мало, что создаваемая ею сила незначительна.

СИМПЛИЧИО. Даже я понимаю, что это становится ужасной неразберихой. Маленькая пружинка будет задевать за главную пружину.

САЛЬВИАТИ. Будет лучше, если мы поместим эту маленькую пружинку внутри главной пружины,

пружинка растянулась ровно наполовину; этим и будет определяться стандартное растяжение главной пружины.

САЛЬВИАТИ. Раскручивать будет легче, если мы привяжем основную бечевку к большому кольцу и наденем это кольцо на вертикально расположенную палку, которую экспериментатор держит в руке. Мы можем предотвратить соскальзывание



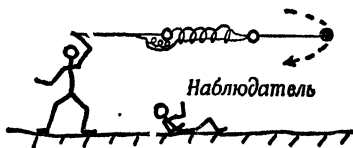
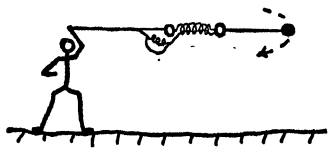
Фиг. 141.

а не будем протягивать ее снару-
жя.

СИМПЛИЧИО. Боюсь, что мы испортим маленькую пружинку, прежде чем сможем провести изме-

рения, добавив две шайбы и два гвоздя.

САГРЕДО. Теперь у нас есть приспособление, которое стоит испытать.



Фиг. 142.

рения. Мы будем крутить очень быстро и безнадежно растянем ее.

САГРЕДО. Хорошо, но вы уже предлагали средство против этого.

СИМПЛИЧИО. Да, воспользуйтесь снова моим предложением.

СИМПЛИЧИО. Но мы еще не использовали закон Гука.

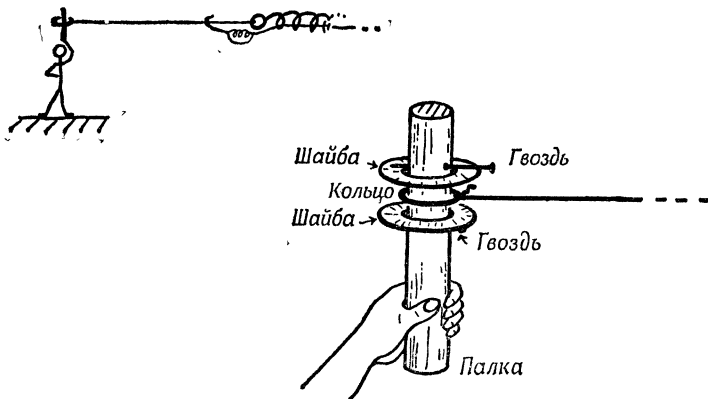
САГРЕДО. Мы в нем не нуждаемся. Мы просто подвесим пружину и измерим нагрузку, которая растягивает пружину до той же длины,

что и во время вращения. Экспериментаторы должны потренироваться для того, чтобы вращать как раз с той скоростью, при которой маленькая пружинка окажется растянутой ровно наполовину; тогда они могут замерять время. После этого можно подвесить пружину вертикально и измерить ее натяжение при стандарт-

но. Я не верю в то, что мы сможем гарантировать точность измерений и сделать желаемую проверку.

САЛЪВИАТИ. А я смогу, если попрактикуюсь и буду очень внимательным.

САГРЕДО. Думаю, что оба вы ошибаетесь. Имелось в виду сконструировать простой прибор. Изме-



Фиг. 143.

ном растяжении, нагружая ее. При этом можно одновременно измерить радиус орбиты — измерить R на подвешенной вертикально и нагруженной пружине.

СИМПЛИЧИО. О, так мне не придется все время бегать с линейкой.

САЛЪВИАТИ. Конечно нет, но вы можете помочь при измерении R . Боюсь, что центральный колышек не будет стоять неподвижно: экспериментатору, поддерживая вращение, придется двигать его по маленькому кругу. Наблюдая за этим, вы можете прикинуть из измерений на подвешенной пружине во время вращения, сколько надо добавить или вычесть, чтобы получить правильное значение радиуса.

СИМПЛИЧИО. Но это еще больше усложняет задачу. Теперь наше приспособление уже ненадеж-

рения будут приближенными. Но если выражение Mv^2/R является точным, тогда различия между непосредственно измеренной силой и силой, рассчитанной из Mv^2/R , будут обусловлены случайными ошибками измерения. Отклонения будут одинаково часты в одну и в другую сторону. Группироваться они будут вблизи нуля, если эксперимент делается много раз, предпочтительно разными наблюдателями. Я предлагаю просить большую группу экспериментаторов, работающих попарно, испытать наш прибор. Пусть каждая пара выражает разницу между измеренной и «вычисленной» ими силой в процентах от ее величины. Изучая эти отклонения, мы узнаем, удалась ли наша проверка.

САЛЪВИАТИ. Мы даже сможем грубо оценить величину откло-

нений, обусловленных допустимыми ошибками эксперимента. Например, если один оборот совершается за 2 сек, то два экспериментатора могут замерить серию из двадцати оборотов несколько раз. Вряд ли они ошибутся более чем на несколько десятых долей секунды при полном измеряемом времени 40 сек; ошибка будет, скажем, 0,2 сек за 40 сек, или 2 сек за 400 сек, или 0,5 сек за 100 сек, т. е. 0,5%. Время одного оборота исполь-

зуется для получения v , а v содержится в Mv^2/R дважды. Таким образом, ошибка в измерении времени дает вклад $0,5\% + 0,5\% = 1\%$ в возможную ошибку Mv^2/R . Мы можем оценить возможные ошибки, истекающие из других ошибок измерения.

САГРЕДО. Пусть уже экспериментаторы сделают это сами. Тогда они больше узнают о достоверности своих результатов ¹⁾.

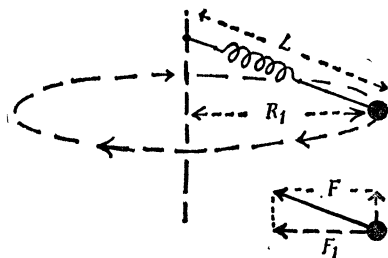
Задача 4

Из геометрии следует, что точка (или небольшое тело), движущаяся с постоянной скоростью v по кругу радиусом R , имеет центростремительное ускорение v^2/R . Напишите геометрический вывод этого выражения. (Вы можете предположить, что скорость и ускорение — векторы, т. е. подчиняются законам геометрического сложения и вычитания. Вы можете пользоваться свойствами подобных треугольников. Дайте большие, очень четкие эскизы: один — для фактической картины, другой — для векторов.)

Задача 5

В предлагаемых ниже вопросах предполагается: 1) центростремительное ускорение равно v^2/R и 2) в случае этого движения $F=Ma$. (Вспомним, что всякий раз, когда вводится $F=Ma$, сила должна быть выражена в ньютонах, если масса выражена в килограммах.)

¹⁾ Физик-профессионал, наблюдая за этим экспериментом, сейчас же выскажет возражение, связанное с тем, что вращающиеся веревки+пружина не движутся в горизонтальной плоскости, а описывают широкий конус. Радиус круга R_1 , по которому движется гиря (фиг. 144), полностью не опреде-



Фиг. 144.

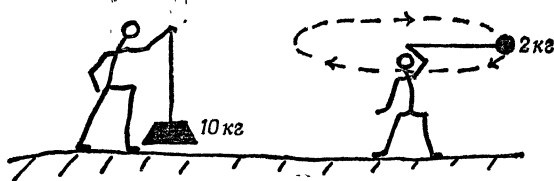
ляется длиной веревки+пружины, а равен части этой длины. Горизонтальная сила, заставляющая гирю двигаться по окружности, не равна натяжению веревки+пружины, а составляет часть ее. Наблюдение за действительным экспериментом такого рода успокаивает критика — он видит: наклон мал, поправочные множители близки к 1,00. А небольшой геометрический расчет поражает его — он находит, что обе поправки точно компенсируют друг друга!

- а) Камень массой $2,00 \text{ кг}$ вращается (с помощью веревки) по горизонтальной поверхности стола без трения. Длина веревки $4,0 \text{ м}$, следовательно, круг имеет радиус, равный 4 м . Камень движется по орбите со скоростью $7,00 \text{ м/сек}$. Рассчитайте ускорение камня, натяжение веревки. Приведите краткие пояснения.
- б) Предположим, что веревка разрывается как раз при том натяжении, которое вы определили выше. Какова будет разрывающая сила в килограммах силы, кг ?
- в) Как и в вопросе (а), камень массой $2,00 \text{ кг}$ вращается по кругу на веревке длиной $4,0 \text{ м}$, но с такой скоростью, что он совершает пять оборотов за 2 сек . Рассчитайте его скорость (ответ оставьте в виде сомножителей, не подставляя численного значения π). Рассчитайте натяжение каната. (Укажите единицы измерения в ответе. Можно положить $\pi^2 \approx 10$.)

Задача 6

Веревка, подвешенная вертикально, может выдержать только $10,0 \text{ кг}$ и рвется при малейшем увеличении нагрузки.

- а) Какова разрушающая сила в килограммах силы?
- б) Какова эта разрушающая сила в ньютонах?



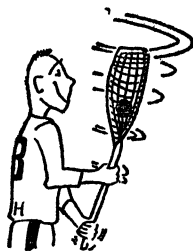
Фиг. 145. К задаче 6.

Кусок такой веревки длиной $1,00 \text{ м}$ используется для вращения камня массой $2,0 \text{ кг}$ по горизонтальному кругу все быстрее и быстрее, пока веревка не разорвется.

- в) Рассчитайте максимальную скорость камня на орбите и приведите краткое объяснение, как вы выполнили этот расчет.

Задача 7

Игрок с ракеткой, на которой находится мяч, крутит ракеткой перед собой. Объясните, каким образом такое движение не позволяет мячу упасть.



Фиг. 146. К задаче 7.

Задача 8

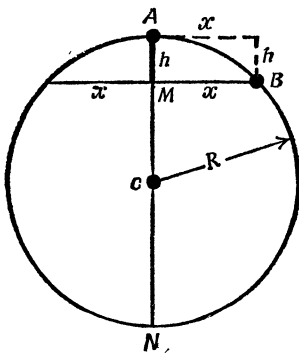
Самолет, летящий со скоростью 600 фут/сек (410 миль в час), преследует маленький самолет, летящий со скоростью 300 фут/сек. Маленький самолет поворачивает и удаляется по горизонтальному полукругу; самолет-преследователь старается нагнать его. Пилот может выдержать ускорение только до 5 g.

- Рассчитайте радиус наименьшего полукруга, который пилот маленького самолета может благополучно выполнить при скорости 300 фут/сек.
- Как долго (примерно) будет двигаться по своему полукругу маленький самолет?
- Вычислите радиус наименьшего полукруга, безопасного для самолета-преследователя.
- Где будет находиться самолет-преследователь, когда маленький самолет уже закончит свой полукруг (обозначьте его путь на эскизе)?

Задача 9. Вариант вывода соотношения $a = v^2/R$ (метод Ньютона)

Если тело движется по окружности от A до B , рассмотрите его как падающее тело с постоянным ускорением, направленным вниз. За время t оно пролетит с ускорением a расстояние h от той точки, в которой оно раньше покоилось.

Фиг. 147. К задаче 9.



- Напишите уравнение для a через h и t , предполагая, что a постоянно.
- Используя геометрическое свойство хорд круга, напишите уравнение, в котором h было бы выражено через другие измеряемые величины, приведенные на диаграмме.
- Подставьте выражение для h в уравнение, полученное в вопросе (a).
- Представьте, что B движется все ближе и ближе к A . Если $B \rightarrow A$, то горизонтальное расстояние $x \rightarrow$ к дуге $\widehat{AB}$ и, поскольку $B \rightarrow A$, хорда $MN \rightarrow$ к диаметру $2R$. Внесите эти изменения в выражение для ускорения.

Задача 10. Центрифугирование

- а) Центрифуга вращает пробирку по кругу со средним радиусом 1 фут со скоростью 5000 оборотов в минуту; содержимое пробирки находится при этом в силовом поле, во много раз большем g . Во сколько раз большем g ?
- б) Образец мутной воды содержит частицы, размер которых примерно равен размерам кровяных шариков (диаметр 10^{-5} м). Если пробирка расположена вертикально, частицы падают на дно с постоянной скоростью $\sim 1/4$ дм/мин. Таким образом, объем жидкости высотой 4 дм полностью очистится примерно за $1/4$ часа. (Эти частицы не оседают все на дно. Диффузия, связанная с броуновским движением, поддерживает некоторое их количество во взвешенном состоянии.) За какое время тот же образец станет прозрачным в центрифуге, обеспечивающей ускорение, определенное в вопросе (а)?
- в) Белковые молекулы [диаметр которых в несколько сотен раз меньше диаметра частичек мути, о которых говорится в вопросе (б), но велик по сравнению с диаметром других молекул, скажем соли или воздуха] осаждаются в воде примерно в 300 000 раз медленнее, чем частички мути (вопрос б). За какое время станет прозрачной помещенная в центрифугу 4-дюймовая пробирка, содержащая суспензию таких белковых молекул в воде?
- г) Если эту белковую суспензию не помещать в центрифугу, она никогда не станет прозрачной. Почему?
- д) Если известна плотность частиц, то, исходя из скорости прояснения жидкости, можно определить диаметры частиц. (Сила торможения маленькой сферы пропорциональна ее радиусу и скорости.) Частички грязи (вопрос б) могут быть измерены с помощью микроскопа, молекулы же белка увидеть невозможно. «Химические» измерения (осмотическое давление) показывают, что молекулы белка в 10^6 раз тяжелее атома водорода. Какая важная информация о строении атома может быть получена с помощью измерений на центрифуге?

«Если я видел дальше, чем другие, то лишь потому, что стоял на плечах гигантов».

*Изречение, приписываемое
Ньютону.*

Жизнь и труды Ньютона

Ньютон родился в тот год, когда умер Галилей. Еще ребенком он увлекался опытами. И подобно Галилею и Тихо Браге мастерил занимательные игрушки, вроде водяных мельниц ¹⁾, и даже измерял «силу» ветра, замечая, насколько он мог прыгнуть в длину *по ветру и против него*. Поступив в школу, он поначалу не проявил особых успехов в изучении основного предмета — латыни, но вскоре обнаружил необыкновенные способности в математике. Его добровольный опекун дядя направил Исаака, когда тому исполнилось 19 лет, в университет. Там, в Кембридже, Ньютон с большим увлечением занялся логикой и изучил трактат Кеплера, посвященный оптике. Сделал он это так быстро и обстоятельно, что понял бессмысленность дальнейшего посещения лекций. Ознакомившись с евклидовой геометрией, он счел ее детской забавой и начал изучать геометрию Декарта. Для этого ему пришлось напряженно работать, но это не смущало Ньютона — душой и телом он отдался изучению математики. Вскоре появилась его первая оригинальная работа. Будучи еще студентом, он открыл теорему, которая была впоследствии названа «Теоремой о биноме Ньютона» ²⁾, а к тому времени, когда ему минул 21 год, он начал

¹⁾ Детские игры с кубиками, игрушками, печками, кранами позволяют получить определенный опыт — то, что мы называем здравым смыслом. Когда мы говорим «здравый смысл подсказывает нам это», мы часто апеллируем именно к такому опыту, даже иногда вопреки предрассудкам и традициям.

²⁾ Биномиальная теорема:

$$(1+x)^n = 1 + \frac{n}{1}x + \frac{n(n-1)}{1 \cdot 2}x^2 + \frac{n(n-1)(n-2)}{1 \cdot 2 \cdot 3}x^3 + \dots$$

Если n — положительное целое число, ряд содержит $n+1$ член. В других случаях ряд бесконечен и значения x не должны превосходить единицу, чтобы

изучать бесконечные ряды и «флюксии» — основу дифференциального исчисления. Ньютон был слишком увлечен своей работой, а быть может, слишком скромн, но свои открытия он не публиковал — эта удивительная отрешенность, а возможно, и нелюбовь к публичным обсуждениям его трудов сохранилась на всю жизнь. Ньютон интересовался и астрономией, наблюдал гало Луны, комету.

Позднее он стал изобретать и строить свои собственные телескопы. Степень бакалавра Ньютон получил, продолжая исследования по математике и оптике, подавая зачастую профессору математики ценные советы. В последующие два года он сосредоточил свое внимание на Солнечной системе и начал размышлять о силе тяжести, распространяющейся до Луны и удерживающей ее на орбите, так же как веревка удерживает вращающийся камень. Ньютону удалось получить выражение для центростремительного ускорения $a=v^2/R$. Эта формула была ему нужна для проверки идеи о движении Луны. Он вывел эту формулу до того, как ее опубликовал Гюйгенс. Затем он применил этот подход и к планетам, предположив, что они удерживаются на своих орбитах гравитационным притяжением Солнца. Таким путем была установлена универсальность силы тяжести: притяжение между Землей и яблоком, Землей и Луной, Солнцем и Марсом, Солнцем и Землей...

На основе третьего закона Кеплера Ньютон сделал вывод, что силы притяжения должны убывать с увеличением расстояния и что притяжение должно изменяться как $(расстояние)^{-2}$. По существу он уже свершил свои великие открытия. Когда его спрашивали, каким путем он пришел к этим открытиям, Ньютон отвечал, что сделал открытия, думая о них ¹⁾. По-видимому, это и был его метод: спокойное, постоянное обдумывание, непрерывное вынашивание мысли. Вероятно, именно таким образом родились многие великие идеи. Гений — не только терпение или «безграничная способ-

приведенная формула оставалась справедливой. Когда x много меньше единицы, можно записать $(1+x)^n \approx 1+nx$, потому что все остальные члены малы по сравнению с первыми. Это дает несколько полезных приближенных выражений, таких, как $(1+x)^3 \approx 1+3x$ или $\sqrt{1+x} \approx 1+\frac{1}{2}x$, если x мало. Отсюда, в частности, следует, что ошибка $y\%$ в величине $\dot{Y}$ приводит к ошибке $3y\%$ в величине Y^3 и к ошибке $\frac{1}{2}y\%$ в величине $\sqrt{Y}$.

П р и м е р ы. Если твердое тело нагревается и его размеры увеличиваются на $0,02\%$, то его объем увеличивается на $0,06\%$. Когда маятник часов удлиняется летом на $0,02\%$, его период колебаний возрастает только на $0,01\%$.

¹⁾ «...всегда думал о них. Предмет исследования постоянно передо мной, и я жду, пока первые пробивающиеся лучи рассвета постепенно не осветят его сильным и ярким светом».

ность трудиться»; терпение и упорство должны еще сочетаться с большими способностями и мудростью, чтобы последние могли принести богатый урожай.

При проверке теории движения Луны Ньютон встретил серьезные трудности и перестал заниматься ею, отложив эту работу на несколько лет, а сам с головой ушел в оптические исследования, покупал призмы, шлифовал линзы, занимался исследованием спектра.

К 24 годам Ньютон заложил основы своих будущих великих открытий: дифференциального и интегрального исчислений, всемирного тяготения, теории света и цвета. Однако лишь немногие из полученных им результатов стали известны миру. Однажды профессор математики рассказал Ньютону о новом математическом открытии, которое обсуждалось в то время. Неожиданно Ньютон ответил, что еще несколькими годами ранее наряду с другими задачами он решил и эту задачу. Из представленных им записей следовало, что он провел более глубокое исследование и получил более общее решение. Этот случай произвел столь сильное впечатление, что, когда вскоре профессор ушел в отставку, Ньютон (ему было тогда 26 лет) был избран профессором математики одной из наиболее значительных европейских кафедр. На новом посту он читал лекции по оптике, однако все еще не публиковал своих математических трудов. В только что созданном Лондонском королевском обществе состоялась лекция Ньютона об изобретенном им отражательном телескопе. Члены Королевского общества пришли в восторг и избрали его членом общества. В дальнейших лекциях он изложил свои открытия в области учения о цвете.

Именно тогда, после шестилетнего перерыва, Ньютон возвратился к работам по астрономии. Теперь он мог блестяще проверить теорию, основываясь на данных о движении Луны. Но он продолжал свою работу еще не менее двенадцати лет, не заявляя о своем открытии. Тем временем законы Кеплера ждали своего объяснения. Идея всемирного тяготения буквально витала в воздухе. Члены рожденного недавно и процветающего Королевского общества горячо обсуждали эту идею. Им удалось доказать, что наличие некой силы, убывающей обратно пропорционально квадрату расстояния, может объяснить существование круговых орбит в соответствии с третьим законом Кеплера, однако эллиптические орбиты оказались для них слишком крепким орешком. Когда один из членов Королевского общества обратился к Ньютону за помощью, Ньютон спокойно ответил, что задача уже решена: он знает и может доказать, что из убывания силы тяготения *обратно пропор-*

ционально квадрату расстояния следует, что движение планет должно подчиняться всем трем законам Кеплера!

Затем наступило время написания, публикации (что делалось не всегда охотно) и распространения трудов Ньютона по механике, астрономии и математике, которая в них содержалась. Коллеги по Королевскому обществу просили его опубликовать свою теорию Солнечной системы. Созданная им книга оказалась более широкой по содержанию. Это был величайший трактат по механике: замечательная последовательность определений, законов, теорем и их применение к теории Солнечной системы с пояснениями, примерами и далеко идущими предсказаниями — величественное здание науки. Это были знаменитые «Принципы» Ньютона — «Математические принципы натуральной философии».

Почитатели трудов Ньютона провели его в парламент, а позднее он был назначен директором Монетного двора. Так был найден путь материально вознаградить ученого, а также отметить его заслуги. Ньютон серьезно принялся за работу и выполнил несколько исследований по металлургии, вспомнив свои ранние увлечения химией ¹⁾.

Назначение в Монетный двор и выборы в парламент в определенной мере соответствовали его стремлению стать влиятельным человеком. На шестьдесят первом году Ньютон был избран президентом Королевского общества. Он возглавлял это славное учреждение в течение 24 лет, до конца жизни. Когда Ньютону исполнилось 65 лет, его возвели в рыцарское достоинство, и он стал сэром Исааком Ньютоном. Не только соотечественники, но и жители близких и далеких континентов понимали, что среди них живет не просто великий человек, а гений, и делали все возможное, чтобы воздать ему должное, хотя в те времена ученые только начинали занимать подобающее им положение.

Ньютон умер в возрасте 85 лет. Он оставил после себя книги, посвященные законам движения, гравитации, астрономии и математике, и, кроме того, многочисленные сочинения на богословские темы. (Ньютон был искренне верующим человеком, хотя взгляды его на религию не были ортодоксальными. С блестящим успехом решив астрономические проблемы, он надеялся, что сумеет справиться также и с религиозными.) Ньютон возвысил астрономию; он дал ей совершенно новое место в науке и привел ее в порядок,

¹⁾ В Кембридже Ньютон предпринял широкие химические исследования, получив большое количество опытных данных, но и он не смог преодолеть царившего в то время хаоса в химических воззрениях.

использовав объяснения, в основе которых лежали созданные и проверенные им законы. Позже мы расскажем о развитии астрономии, а пока возвратимся к работам Ньютона в этой области.

Законы движения

Чтобы привести движения небесных тел в единую систему, Ньютону были необходимы законы движения. В сочинениях Галилея он нашел четкие определения силы и движения, но менее четкое понимание природы массы. Ньютон дал ясные и доступные новые формулировки определениям Галилея, тщательно проверив смысл введенных им терминов. Основные положения *Принципов* изложены в форме двух законов, которые используются в первой части. Затем Ньютон дополняет их и третьим законом, который сам проверяет опытным путем¹⁾.

В этом смысле Ньютон был великим законодателем, приведшим законы в строгую систему,— своего рода Моисеем в физике. Конечно, Моисей устанавливал законы с совершенно иных позиций, чем Ньютон, трактуя людям указания небес, тогда как Ньютон открывал законы природы и разъяснял их людям. Однако и Ньютон и Моисей познавали, систематизировали, учили. Моисей не был открывателем всех законов и правил. Он лишь собрал их воедино и обработал, чтобы сделать понятными и сообщить людям. Он был великим законодателем и великим учителем. Ньютон, подобно Моисею, был великим учителем, хотя был так застенчив и скромн, что учил скорее себя, нежели других. Многие труды Ньютон написал только для того, чтобы понять самому сущность вещей, но, увидев свет, эти труды осветили путь его современникам и ученым последующих поколений.

¹⁾ По-видимому, третий закон был сформулирован, когда Ньютону потребовалось изложить механику систематически,— другие законы и так обеспечивали развитие основной идеи. Закон был проверен в таком опыте: сталкивались два груза маятников и измерялись их скорости *до* и *после* соударения. Затем Ньютон вычислял изменения импульса. Он нашел, что эти величины равны и противоположно направлены у каждого груза. На основе второго закона Ньютон пришел к выводу, что действующие силы должны быть равны и противоположно направлены. Таким образом, опыт явился точной проверкой третьего закона. (Попытки «доказать» третий закон, растягивая в противоположные стороны пару пружинных весов или рассматривая действие сил на книгу, лежащую на столе, ни к чему не приведут. В таких попытках могут встретиться доводы, образующие порочный круг, или же они могут подтвердить первый закон вместо третьего.) В своих опытах Ньютон с большим искусством учел трение маятников о воздух. В *Принципах* дано подробное описание этих опытов.

Был этот мир крошечной тьмой окутан
«Да будет свет!» — и вот явился Ньютон.

Ньютон излагал свои законы ясно и просто, без излишней торжественности. Но поскольку он не любил дилетантского критицизма, математическая сторона его изложения отличается строгостью и элегантностью. Во времена Ньютона латынь была тем универсальным языком, на котором объяснялись ученые, поэтому *Принципы* написаны на латинском языке. В трудах, которые Ньютон писал на английском языке (например, в его книге по оптике), изложение кажется нам иногда напыщенным и неясным; объясняется это тем, что со временем в английском языке произошли значительные изменения и современный Ньютону язык звучит для нас непривычно. Если бы Ньютон писал свои законы в наши дни, они были бы написаны стилистически безупречно, без вводных фраз, которые так любят адвокаты. Ниже приведены законы Ньютона в оригинальной латинской формулировке, данной в *Принципах*, и их перевод,

LEX I

Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus a viribus impressis cogitur statum illum mutare.

LEX II

Mutationem motus proportionalem esse vi motrici impressae et fieri secundum lineam rectam qua vis illa imprimitur.

LEX III

Actioni contrariam semper et aequalem esse reactionem: sive corporum duorum actiones in se mutuo semper esse aequales et in partes contrarias dirigi.

Каждый закон Ньютон сопровождал комментариями и объяснениями. Пользуясь современной терминологией, им можно дать такой перевод:

ПЕРВЫЙ ЗАКОН

Всякое тело остается в состоянии покоя или движется прямолинейно с постоянной скоростью, если на него не действует сила, изменяющая скорость тела.

ВТОРОЙ ЗАКОН

Если на тело действует сила, то изменение количества движения (Mv) пропорционально величине приложенной к телу силы; *изменение происходит в направлении действия силы*

или:

Произведение массы на ускорение пропорционально результирующей силе, причем ускорение происходит в направлении действия силы.

ТРЕТИЙ ЗАКОН

Каждому действию соответствует равное и противоположно направленное противодействие

или:

При взаимодействии двух тел сила, приложенная со стороны первого тела ко второму, равна силе, приложенной со стороны второго тела к первому, и противоположно направлена.

Заметим, что в переводе второго закона вначале дана его формулировка, в которой используется понятие количества движения. Она и ныне является наиболее общей формулировкой. Ко второй формулировке, где используется ускорение, часто прибегают в процессе элементарного обучения, так как она выглядит проще. В гл. 8¹⁾ было указано, что эти две формулировки эквивалентны. Ниже показано, как одна форма закона переходит в другую: $F \sim Ma$. Скорость изменения количества движения пропорциональна силе:

$$\frac{\Delta (Mv)}{\Delta t} \sim F, \quad \text{т. е.} \quad \frac{Mv_2 - Mv_1}{\Delta t} \sim F,$$

$$\frac{M(v_2 - v_1)}{\Delta t} \sim F, \quad \text{если } M \text{ остается постоянной.}$$

Иначе говоря,

$$M \frac{\Delta v}{\Delta t} \sim F, \quad \text{т. е.} \quad Ma \sim F, \quad \text{или} \quad F \sim Ma.$$

Пользуясь изобретенным Ньютоном дифференциальным исчислением:

$$\frac{d(Mv)}{dt} = M \frac{dv}{dt} = Ma, \quad \text{если } M \text{ — величина постоянная.}$$

¹⁾ Гл. 8 («Столкновения. Количество движения») входит в т. 1 настоящего издания.

Мы предполагали, что масса остается постоянной. Если масса меняется, то справедлива первая форма закона $[\Delta(Mv)/\Delta t \sim F]$, и именно ее выбрал Ньютон. Он понимал, что такая форма закона приложима к движению тела с переменной массой (например, вагонетка под дождем). Но он не мог, конечно, предвидеть применения этой формы закона в современной теории относительности, где она также справедлива для случая, когда масса возрастает с увеличением скорости. Это возрастание заметно *только при очень больших скоростях*.

Прежние представления о движении

Природа движения давно волновала ученых.

Леонардо да Винчи (за 150 лет до Ньютона) дал следующие формулировки, заимствованные, как предполагают, из еще более ранних источников:

- 1) Если сила перемещает тело за данное время на определенное расстояние, то та же сила половину такого тела переместит на такое же расстояние за вдвое меньшее время,
- 2) *или*:... та же самая сила переместит половину тела на вдвое большее расстояние за то же самое время,
- 3) *или*:... вдвое меньшая сила будет перемещать половину тела на то же расстояние за то же время.

Декарт (примерно за 40 лет до Ньютона) утверждал, что

- 1) все тела стремятся оставаться в неизменном положении;
- 2) движущееся тело стремится сохранить свою скорость и направление движения. (Здесь Декарт приводит богословский довод.) Мерой силы, создаваемой телом, служит масса (ясно не определенная Декартом) и его скорость.

В о п р о с: Какие из этих формулировок кажутся верными? (По крайней мере одна из них совершенно ошибочна.)

Опираясь на эти формулировки, а также руководствуясь книгами Галилея и собственными соображениями, Ньютон сформулировал три закона движения. В наши дни мы применяем их для описания разнообразных движений — от катящегося вниз шара до старта ракет, планет на орбитах и даже потоков электронов. Эйнштейн добавил новую формулировку, но в большинстве случаев законы Ньютона очень хорошо описывают явления природы.

Законы Ньютона: Реальность или Определения?

Подобно любому современному ученому, Ньютон пытался дать четкие определения скорости, количества движения и силы. В науке определение не является экспериментальным фактом, рискованным предположением или умозрительной идеей. Это скорее работа, заключающаяся в пояснении — по возможности точном — смысла слова, фразы или даже идеи. Например, мы определяем ускорение как $\Delta v/\Delta t$, после чего всегда под словом «ускорение» понимаем отношение *приращения скорости* к соответствующему *приращению времени*, а не что-то другое, например $\Delta v/\Delta s$ или нечто неопределенное, вроде «более быстрого движения». Мы определили «напряженность гравитационного поля в данной точке» как *силу тяжести*, действующую на *единичную массу*, помещенную в эту точку». Это — и описание того, что мы понимаем под напряженностью поля, и четкое указание, как ее измерить.

Законы Ньютона были четкими правилами, основанными на наблюдении механических процессов. Они предназначены для предсказания движения в других случаях. Однако это не простые утверждения того, что получалось на опыте. Законы включали определения и описания понятий и представлений (масса, количество движения); они обеспечивали непротиворечивую схему предсказаний, основанную на *этих определениях*. Таким образом, определения часто входят в состав теории. Например, через двести лет после Ньютона получила развитие наука о термодинамических процессах, на основе которой с помощью понятия температуры были сделаны замечательные предсказания тепловых свойств. Но температурная шкала — особая, *определенная* собственно в *схеме термодинамики*. Мы обнаружим расхождения, если сравним термодинамическую шкалу температуры (шкалу Кельвина) с другими шкалами, такими, как шкала ртутного или газового термометров. Тем не менее мы не можем сказать, что одна шкала «неверная», а другая «истинная». Все шкалы определены четко и однозначно и одинаково пригодны для точного измерения не совсем определенного ощущения жары или холода, испытываемого человеком. Имея в виду определенные задачи, иногда отдают предпочтение одной шкале как наиболее удобной; когда имеют дело с теорией — ограничиваются шкалой, которая входит в теорию. В соответствии с законами термодинамики и выводами из них нам приходится пользоваться шкалой Кельвина. К счастью, шкала Кельвина почти не отличается от шкалы обычного ртутного термо-

метра, так что выводы термодинамики мы можем непосредственно использовать в практических целях.

Такое тесное переплетение эксперимента и определений, образующее теорию, характерно для современной науки. Если вы критически посмотрите на законы Ньютона, то придете к заключению, что первый закон содержит объяснение понятия силы, определяет ее природу, а второй закон определяет способ измерения или силы, или массы. Так, может быть, эти законы — просто плод нашей фантазии? Нет, это не так. Оба закона соответствуют реальным явлениям природы, что подтверждает эксперимент. В них содержится твердая фактическая основа, хотя ее, быть может, нелегко извлечь логически из входящих в эти законы определений.

Спустя два столетия после того, как Ньютон сформулировал свои законы, начали возникать трудности и сомнения. Ньютон принимал «относительность Галилея». В созданной им теории не имеет значения, движется ли наблюдатель с постоянной скоростью или находится в состоянии покоя. Однако Ньютон считал, что абсолютную систему отсчета можно обнаружить по эффекту вращения. (Если бы Земля оказалась в состоянии покоя, а небесные тела вращались вокруг нее, разве могли бы мы наблюдать кривизну земной поверхности, изменение силы тяжести, поворот плоскости качания маятника Фуко?) Ньютон писал об абсолютном движении: под действием сил возникают абсолютные ускорения, а не ускорения относительно какой-то движущейся системы координат. Но где находится неподвижная, фиксированная система отсчета? Земля, Солнце, звезды — все движется. Существует ли реальная фиксированная система отсчета? Если мы не можем указать такой системы, то стоит ли включать ее в наше рассмотрение механики? Вот из таких сомнений и возникла теория относительности ¹⁾. На первых порах, изучая теоретическую механику, разумно забыть об этих сомнениях и принять законы Ньютона как простые, надежные рабочие правила. Используя их для решения задач, помните, что это — блестяще сформулированный итог согласованных определений и экспериментальных наблюдений. Это не застывшие законы, которые нужно цитировать, чтобы все стало на свои места! Они указывают нам, как нужно обрабатывать результаты проведенных опытов и как предсказывать, что должно

¹⁾ Специальная теория относительности Эйнштейна обходится без фиксированной в пространстве системы отсчета. Общая теория относительности еще использует систему отсчета, связанную с неподвижными звездами, например для предсказания медленного вращения орбиты Меркурия.

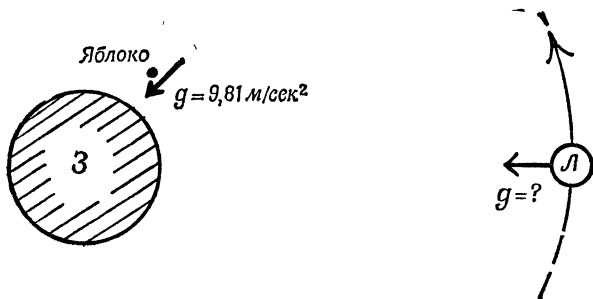
случиться в будущих экспериментах. В то же время они знакомят нас с такими полезными понятиями, как масса и количество движения.

Ньютон и движение планет

Ньютон сформулировал свои законы так, чтобы иметь возможность пользоваться ими. Обратившись к проблемам астрономии, он сразу же ответил на вопрос, который не могли решить греки и который поставил в тупик Кеплера и даже Галилея: «Что удерживает Луну и планеты при их движении по орбитам?» Предполагалось все — хрустальные сферы, естественное круговое движение, вращающиеся рычаги и магнитные флюиды, вихри. Ньютон понимал, что такие объяснения содержат детали, в которых нет необходимости. Сила не нужна для движения планеты (первый закон). Предоставленные сами себе, они будут вечно двигаться прямолинейно. Сила необходима, чтобы планеты двигались по криволинейной орбите, ибо если нет силы, то движение будет прямолинейным. Какой должна быть величина *внешней* силы? Откуда она может взяться? Это были новые вопросы, поставленные Ньютоном. Если к этому движению применим второй закон, то необходима внешняя сила, равная произведению *массы* на *ускорение*. Но чему равно ускорение при движении по орбите? Ньютон исследовал равномерное движение по круговой орбите. Орбиты Луны и большинства планет близки к окружности. Он пришел к тому же результату, что и другие ученые, решавшие эту задачу: ускорение, направленное к центру орбиты по радиусу, равно v^2/R , где v — скорость на орбите, а R — радиус орбиты. (См. главу 21, где вводится это ускорение. Для этого используются геометрические представления, но масса и сила не фигурируют. Ньютон получил свой результат необычным путем, рассматривая движущееся тело как снаряд и каждый элемент длины окружности как участок вблизи вершины параболы, по которому движется снаряд.) Тогда сила должна быть равна Mv^2/R и направлена по радиусу к центру орбиты. Так, Луна, движущаяся по круговой орбите, всегда испытывает ускорение в сторону Земли, но никогда не приближается к ней. Это можно представлять себе как падение с касательной к окружности на окружность, причем орбита образуется в результате того, что тело начинает «падать» и достигает в нужный момент следующего участка орбиты, не приближаясь, однако, к ее центру. Если это вам покажется странным, вспомните, что любой снаряд, летящий по параболе, в ее вершине испытывает ускорение g , однако в этой точке снаряд не опускается и не поднимается, таким обра-

вом не приближаясь к Земле. Существуют моменты времени, когда ускорение имеется, но скорость в его направлении равна нулю. Можно сказать, что лунная орбита состоит из последовательных «вершин» парабол.

И вот, наконец, Ньютону удалось объяснить, откуда берется эта сила. Он предположил, что силы, заставляющие падать тела



Фиг. 148. Земное притяжение.

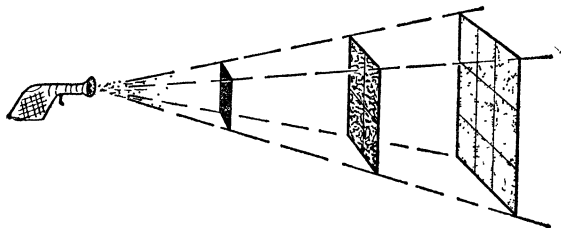
на поверхность Земли, могут также притягивать Луну и служат причиной ее движения по орбите. Существует легенда о том, что Ньютон обдумывал эту проблему, сидя в саду, и яблоко, упавшее ему на голову, подсказало решение. Такое притяжение мы называем «гравитацией» — словом, которое означает тяжесть или подразумевает какую-то связь с весом. Во многих случаях более подходит обычное слово *вес*.

Ньютон предположил, что именно *вес* Луны удерживает ее на орбите. Если бы Луна находилась очень близко от поверхности Земли, то ее вес обуславливал бы ее ускорение g , равное примерно $9,81 \text{ м/сек}^2$, т. е. такое же, как и у яблока, если не считать, что объем Луны больше, и это, конечно, не разрешает поставить подобный эксперимент. Будет ли Луна иметь такое же ускорение на своей орбите? Будет ли на орбите Луны $v^2/R = 9,81 \text{ м/сек}^2$? Луна совершает полный оборот по своей орбите относительно неподвижных звезд за 27,3 дня. Ньютон знал, что радиус лунной орбиты R равен 60 радиусам земного шара, т. е. $60R$. Ему был также приближенно известен радиус Земли, так что он мог вычислить скорость v , разделив длину окружности лунной орбиты $2\pi R$ на время T , равное одному месяцу, а отсюда вычислялось ускорение v^2/R . В ответе получалась величина, *значительно* меньшая $9,81 \text{ м/сек}^2$. Если «гравитация» меняется с расстоянием, g может быть значительно меньше на лунной орбите. Ньютон нашел простое правило убывания

силы притяжения — закон обратной пропорциональности квадрату расстояния. По закону обратных квадратов убывают с расстоянием сила света, интенсивность радиоволн, звука, а также сила, создаваемая магнитным полюсом или электрическим зарядом. Закон обратных квадратов справедлив во всех случаях прямолинейного распространения из источника при отсутствии поглощения ¹⁾. Правильная мысль пришла в голову Ньютону, когда он пытался получить третий закон Кеплера! Он попробовал применить зависимость, обратно пропорциональную квадрату расстояния. Луна находится на расстоянии шестидесяти земных радиусов, а яблоко — на расстоянии лишь одного радиуса от центра Земли, поэтому притяжение в области Луны уменьшается в $1/60^2$ раз, или в 3600 раз. Ускорение Луны уже будет не $9,81 \text{ м/сек}^2$, а $9,81/3600 \text{ м/сек}^2$. Легко подсчитать значение v^2/R для Луны и убедиться, что оно совпадает с «предсказанной» таким способом величиной. Представьте себе тот восторг, который вы бы испытали, открыв это соответствие! Это была успешная проверка соотношений $F=Ma$ и $a=v^2/R$ и закона обратных квадратов для силы тяжести. Вы могли бы сделать первую проверку выдающейся теории — и великое открытие принадлежало бы вам!

Однако сам Ньютон, полный нетерпения, но дальновидный, не был полностью удовлетворен этой проверкой. По непостижимым причинам он отложил все вычисления еще на несколько лет. По-видимому, он стремился решить задачу о притяжении тела шаром с

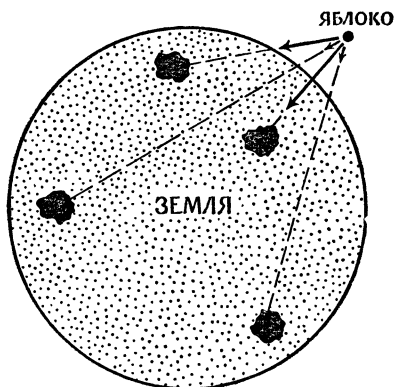
¹⁾ Предположим, что небольшой распылитель испускает струю мелких капель масла. Эти капли летят из ствола по прямым линиям, образуя широкий конус. Если экран (кусоч хлеба, скажем) полностью перекрывает конус на расстоянии 1 м от ствола, то на расстоянии 2 м конус можно перекрыть



Фиг. 149. Закон обратных квадратов.

экраном, площадь которого будет в 4 раза больше, а на расстоянии в 3 м — в 9 раз больше первого, поэтому толщина масла на экранах будет в пропорции $1 : 1/4 : 1/9...$ Это — «закон обратных квадратов намазывания маслом».

распределенной равномерно в нем массой, подобным Земле. Он уменьшил величину g в 60^2 раз, но уменьшение от 1 до $(1/60)^2$ предполагает, что тело на поверхности Земли, для которого ускорение $g=9,81$ м/сек², находится как бы на расстоянии *одного земного радиуса* от притягивающего центра. Притягивает ли громадный круглый земной шар яблоко так, как если бы вся масса Земли была сосредоточена в ее центре на расстоянии 6300 км от поверхности? Близкие от яблока части земной массы должны притягивать его очень сильно (согласно закону обратных квадратов).



Фиг. 150. Задача Ньютона.
Яблоко, притягиваемое различными частями Земли (показаны четыре отдельных элемента).

Другие части земной массы, находящиеся, например, на расстоянии 12 600 км от яблока, будут притягивать его очень слабо. Сила притяжения различных частей земной массы действует на яблоко под разными углами. Какова результирующая всех этих сил? Здесь мы сталкиваемся с очень трудной математической задачей — сложением бесконечного числа различных притяжений. Она легко решается с помощью интегрального исчисления, но этот тонкий математический аппарат в то время только создавался. Ньютон сам изобрел его для решения этой и других задач, входящих в его работу; одновременно это же сделал и немецкий математик Лейбниц. Его вычисления, связанные с движением Луны, были отложены до тех пор, пока он не убедился, пользуясь изобретенным им методом, что шар с равномерно распределенной массой притягивает тела так, как если бы вся его масса была сосредоточена в его центре, при условии, что каждый участок притягивает тела по закону обратных квадратов. «Как только Ньютон доказал эту замечательную теорему, а мы знаем по его собственным словам, что он и не мечтал

получить столь замечательный результат, пока ему не удалось это сделать с помощью собственных математических исследований, весь механизм Вселенной предстал перед ним» ¹⁾. После этого он вернулся вновь к изучению движения Луны и с помощью одного лишь расчета проверил свои законы движения, формулу v^2/R и замечательную идею о законе обратной пропорциональности силы тяжести квадрату расстояния как причины движения Луны по круговой орбите. На сей раз Ньютон был удовлетворен вычислениями. Согласие было полное; необходимая сила получалась за счет уменьшения силы тяжести. Ньютону удалось раскрыть тайну движения Луны.

Объяснение Ньютона

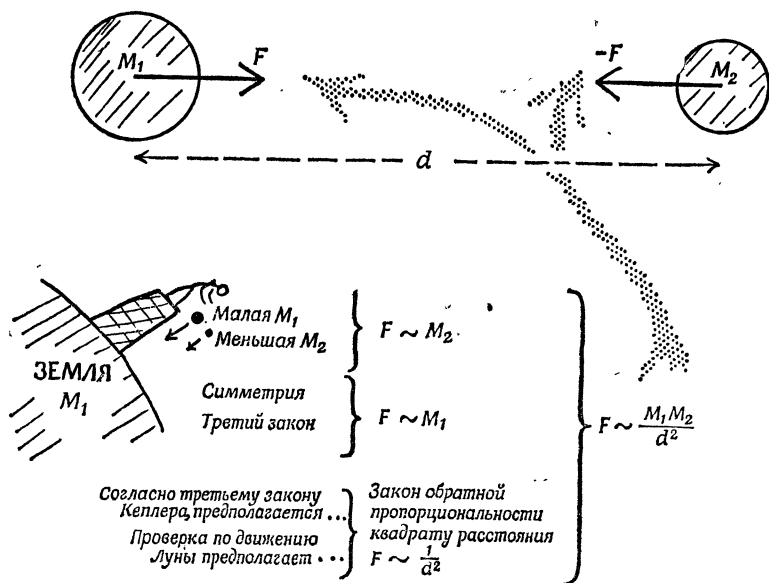
С одной стороны, Ньютон дал *объяснение* проблеме, предположив, что Луну удерживает на орбите сила тяжести. С другой стороны, он ничего не объяснил. Не была объяснена сущность гравитации, не было высказано никаких соображений относительно того, что же, собственно, представляет собой сила тяжести. Ньютон лишь показал, что одна и та же причина вызывает или обуславливает и падение яблока и движение Луны. Подобное нахождение общих причин нескольких явлений и называется в науке «объяснением». Если вы разочарованы, то примите во внимание, что такой шаг упрощает картину природы. Заметьте также, что в обычной речи слово «объяснить» означает сделать понимание явлений более простым, ясным. Это объяснение должно также содержать фундаментальные представления, но в работах Ньютона, как и в большинстве наук, *основные, или первичные причины* не проявляются. Эти работы показали, однако, что явления, которые казались обусловленными различными причинами, тесно связаны между собой. Несмотря на то что мы все глубже изучаем и познаем природу, находя общие связи, основной вопрос о происхождении Вселенной и о том, почему явления в ней протекают именно так, а не иначе, остается пока без ответа.

Всемирное тяготение

Итак, сила тяжести, или, точнее, значительно ослабленная сила тяжести,— вот что удерживает Луну на ее орбите. А как обстоит дело с планетами? Удерживает ли их на орбитах та же сила?

¹⁾ J. W. L. Glaisher, On the bicentenary of the *Principles*, 1887.

Поскольку движутся они вокруг Солнца, а не вокруг Земли, то и притягивающая их сила должна исходить от Солнца, а не от Земли. Рассматривая этот вопрос, Ньютон пришел к выводу, что существует всемирное тяготение: все небесные тела испытывают взаимное притяжение, обратно пропорциональное квадрату расстояния. Последнее следовало из анализа третьего закона Кеплера. Ньютон заключил, что любая часть материи во Вселенной притягива-



Фиг. 151. Всемирное тяготение.

ется всеми другими телами. Он знал из опыта, что вес тел пропорционален их массе (их притягивает Земля). Следовательно, притяжение Земли изменяется пропорционально массе притягиваемого ею тела. Если, согласно третьему закону, притяжение взаимно, то из соображений симметрии нужно учитывать и M_1 — массу Земли, и M_2 — массу притягиваемого тела. Зависимость от расстояния была получена с помощью проверки закона обратных квадратов по движению Луны. Поэтому Ньютон включил в общий закон коэффициент $1/d^2$. Вот сформулированный им закон всемирного тяготения:

$$F \approx \frac{M_1 M_2}{d^2}, \text{ или } F = (\text{ПОСТОЯННАЯ}) \cdot \frac{M_1 M_2}{d^2}, \text{ или } F = G \cdot \frac{M_1 M_2}{d^2},$$

где G — универсальная постоянная; M_1 и M_2 — массы; d — расстояние между ними; F — сила, с которой каждое тело притягивает другое. Нужно помнить, что универсальная постоянная G имеет другой физический смысл, нежели g , — локальное значение ускорения силы тяжести ¹⁾.

Могут ли эти общие законы объяснить движение планет? Ньютон доказал, что могут. Он показал, что притяжение по выведенным им законам обуславливает движение планет по эллиптическим орбитам, причем в одном из фокусов эллипса должно находиться Солнце. Ему удалось легко вывести два других закона Кеплера, которые также вытекают из его гипотезы всемирного тяготения. (Эти законы справедливы, если учитывается только притяжение Солнцем. Но мы должны учитывать и действие на движущуюся планету других планет.) В Солнечной системе эти притяжения незначительны по сравнению с притяжением Солнца, однако в точных расчетах ими нельзя пренебречь.

Так Ньютон перенес простое представление о движении Луны на всю планетную систему. Он предположил, что любое тело притягивается другим с силой, пропорциональной их массам и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними. На основе этой гипотезы он создал подробную картину движения тел в Солнечной системе, свод законов, которые проверялись точными измерениями в течение двух столетий. Спутники планет подчиняются тем же законам. Даже кометы следуют общему правилу. И все эти движения определяются силой тяжести, которая хорошо известна на Земле. Ньютон объяснил небесную систему на основе единой рациональной схемы.

Это столь большое достижение, что следует специально проследить путь, которым Ньютон получил три закона Кеплера и затем использовал их в дальнейшей работе. Первое доказательство того, что движение планеты происходит по эллипсу, можно сделать либо используя изобретенное Ньютоном дифференциальное исчисление, либо опираясь на сложные и громоздкие геометрические доказательства. (Ньютон получил доказательство и геометри-

¹⁾ Для случая Земли и яблока M_1 и M_2 — соответственно массы Земли и яблока; расстояние между ними равно радиусу Земли r . Таким образом, вес яблока $M_2 g = G M_1 M_2 / r^2$. Отсюда следует связь между g и G :

$$g = \frac{G M_1}{r^2},$$

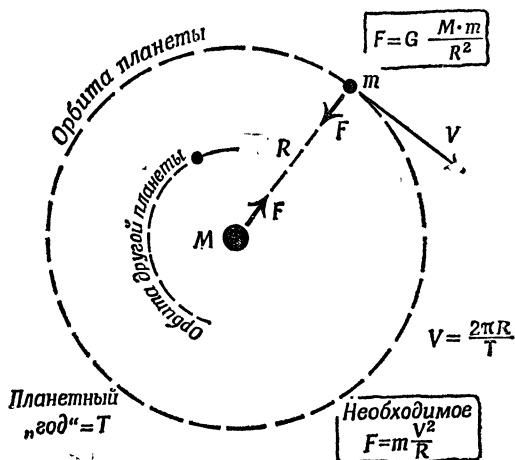
$$\text{УСКОРЕНИЕ } g = \frac{\text{ГРАВИТАЦИОННАЯ ПОСТОЯННАЯ} \cdot \text{МАССА ЗЕМЛИ}}{(\text{РАДИУС ЗЕМЛИ})^2}.$$

ческим путем, чтобы убедить в своей правоте противников дифференциального исчисления.) Мы с большим сожалением опускаем это доказательство.

Выведем теперь третий закон Кеплера, а затем второй закон — закон равных площадей за равные времена. Второй закон следует из произвольной зависимости силы притяжения от расстояния, если эта сила действует по прямой, соединяющей центры планеты и Солнца. Но первому и третьему законам Кеплера удовлетворяет только закон обратной пропорциональности сил притяжения квадрату расстояния.

Третий закон Кеплера

Чтобы получить третий закон Кеплера, Ньютон просто объединил законы движения с законом всемирного тяготения. Эллиптические орбиты движения планеты получаются, если использовать методы дифференциального исчисления, учитывающего изменения радиуса и скорости планеты. В результате таких вычислений получится третий закон Кеплера.



Фиг. 152. Движение планет.

Для случая круговых орбит можно рассуждать следующим образом: пусть планета, масса которой равна m , движется со скоростью v по окружности радиуса R вокруг Солнца, масса которого равна M . Это движение может осуществляться только в том слу-

чае, если на планету действует внешняя сила mv^2/R , создающая центростремительное ускорение v^2/R (см. гл. 21). Предположим, что притяжение между Солнцем и планетой как раз и создает необходимую силу. Тогда

$$G \frac{Mm}{d^2} = \frac{mv^2}{R}$$

и расстояние d между m и M равно радиусу орбиты R . Но скорость

$$v = \frac{\text{ДЛИНА ОКРУЖНОСТИ}}{\text{ПЕРИОД ОБРАЩЕНИЯ}} = \frac{2\pi R}{T},$$

где T — время, за которое планета совершает один оборот. Тогда

$$G \frac{Mm}{R^2} = \frac{(2\pi R/T)^2}{R} m; \quad G \frac{Mm}{R^2} = \frac{4\pi^2 m R^2}{T^2 R}.$$

Чтобы получить третий закон Кеплера, нужно перенести все R и T в одну сторону уравнения, а все остальные величины — в другую:

$$\frac{R^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2}.$$

Если перейти теперь к другой планете, с другим радиусом орбиты R' и периодом обращения T' , то новое отношение $(R')^3/(T')^2$ будет опять равно $GM/4\pi^2$; эта величина будет одинаковой для всех планет, так как G — универсальная постоянная, а масса M — одна и та же для всех планет, вращающихся вокруг Солнца. Таким образом, величина R^3/T^2 будет одной и той же для всех планет в согласии с третьим законом Кеплера. Для других систем, например для спутников Юпитера, величина M будет другой (в этом случае M — масса Юпитера), а R^3/T^2 будет иметь другое значение, одинаковое для всех спутников.

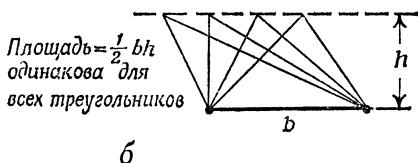
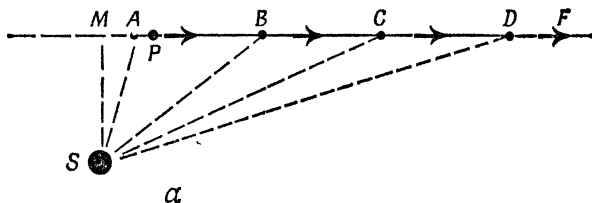
Масса планеты m сокращается. Несколько планет с различными массами могли бы двигаться по одной и той же орбите. Вы могли бы об этом догадаться — ведь это знаменитый эксперимент, но в космическом масштабе.

Если закон убывания силы тяжести отличается от закона обратных квадратов, то отношение R^3/T^2 не будет одним и тем же для всех планет. Например, если использовать закон обратной пропорциональности кубу расстояния, то для всех планет постоянной будет величина R^4/T^2 ; в этом случае величины R^3/T^2 будут пропорциональны $1/R$ и для разных планет будут разными. В действительности, как установил Кеплер, эти величины одни и те же. Это означает, что справедлив закон обратных квадратов.

Дифференциальное исчисление позволяет получить третий закон и для эллиптических орбит, но в этом случае R — средняя величина между наибольшим и наименьшим расстоянием планеты от Солнца.

Второй закон Кеплера

Приведем приближенные вычисления, выполненные Ньютоном. Будем основываться на втором законе Ньютона: *изменение количества движения равно $F \cdot \Delta t$* . Следовательно, изменение mv — вектор, направленный по линии действия силы F и пропорциональный ее величине.



Фиг. 153. Свободное движение планеты.

a — планета P движется прямолинейно с постоянной скоростью; за равные промежутки времени радиус-вектор описывает равные площади; b — свойства треугольников, которыми мы здесь пользуемся.

Вначале предположим, что планета движется свободно, т. е. на нее не действуют силы. Мы можем провести радиусы, соединяющие планету с Солнцем, лишенным гравитации (фиг. 153). Планета P будет двигаться с постоянной скоростью по прямой линии AF (первый закон Ньютона). Обозначим расстояния, пройденные планетой за одинаковые интервалы времени: AB , BC , CD и т. д. Так как скорость постоянна, то $AB=BC=CD$ и т. д.

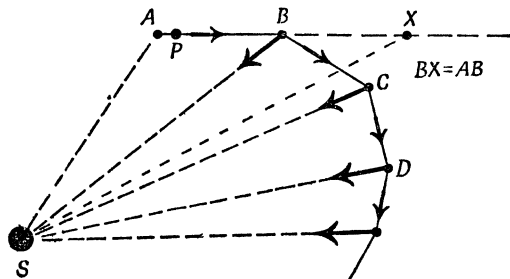
Рассмотрим площади, описываемые радиусом SP в процессе движения. Как сравнить треугольники SAB , SBC , SCD ? У всех

этих треугольников одинаковые высоты SM и одинаковые основания AB , BC , CD . Из этого следует, что площади треугольников равны. Радиус-вектор, проведенный из точки S , описывает одинаковые площади за равные интервалы времени, так что это простое движение подчиняется закону Кеплера.

Теперь предположим, что планета движется по орбите благодаря тому, что Солнце притягивает ее и сила притяжения направлена по радиусу PS . Чтобы упростить геометрическое рассмотрение, предположим, что притяжение действует только в точках A , B , C ,... траектории, а остальное время планета движется

Фиг. 154. Движение планеты с «импульсным» притяжением.

В отсутствие притяжения в точке B планета P двигалась бы по оси X .

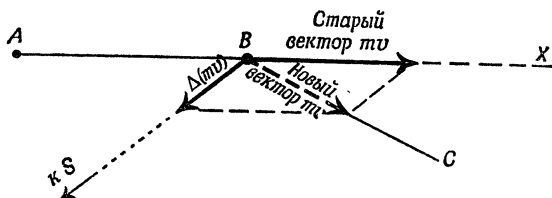


свободно по прямой линии. Тогда траектория планеты будет выглядеть так, как показано на фиг. 154. Предположим, что планета проходит отрезки AB , BC , CD и т. д. за одинаковые отрезки времени, а внешнее усилие возникает только в точках B , C , D и т. д. Планета движется равномерно вдоль AB , затем в точке B испытывает мгновенное воздействие по направлению BS и резко изменяет свою скорость, начиная двигаться (уже с другой скоростью) вдоль BC . Если исключить из рассмотрения точку B , то планета будет продолжать двигаться прямолинейно, как в рассмотренном выше простом примере! Продолжив прямую линию, отложим на ней отрезок BX , равный AB . Если не учитывать притяжения в точке B , то планета пройдет расстояния AB и BX за одинаковые отрезки времени, и радиус-вектор, проведенный из точки X , опишет одинаковые треугольники SAB и SBX . Но в действительности планета достигает вместо точки X положения C . Повлияет ли это на равенство площадей? Если планета приходит в точку C , то нужно рассматривать треугольники SAB и SBC . Равны ли эти треугольники? Усилие действует в точке B по направлению к Солнцу вдоль прямой линии BS и изменяет направление движения. Это усилие придает планете добавочное количество

движения, направленное по прямой BS , которое, складываясь с ее начальным количеством движения, обеспечивает движение планеты по прямой BC . Начальное количество движения направлено по прямой AB . Поэтому

НАЧАЛЬНОЕ КОЛИЧЕСТВО ДВИЖЕНИЯ, НАПРАВЛЕННОЕ ПО AB + ДОБАВОЧНОЕ КОЛИЧЕСТВО ДВИЖЕНИЯ, НАПРАВЛЕННОЕ ВДОЛЬ BS = НОВОЕ КОЛИЧЕСТВО ДВИЖЕНИЯ, НАПРАВЛЕННОЕ ПО BC .

Из второго закона Ньютона следует, что количество движения по BC — вектор. Поэтому суммирование необходимо проводить по законам *векторного сложения* (фиг. 155). Так как масса планеты

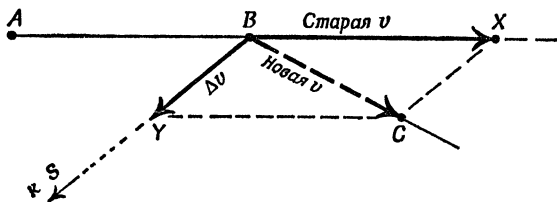


Фиг. 155. Изменение количества движения в точке B .

постоянна, то мы можем сократить ее и пользоваться для сложения скоростями:

СКОРОСТЬ ВДОЛЬ AB + ПРИРАЩЕНИЕ СКОРОСТИ ВДОЛЬ BS = СКОРОСТЬ ПО НАПРАВЛЕНИЮ BC .

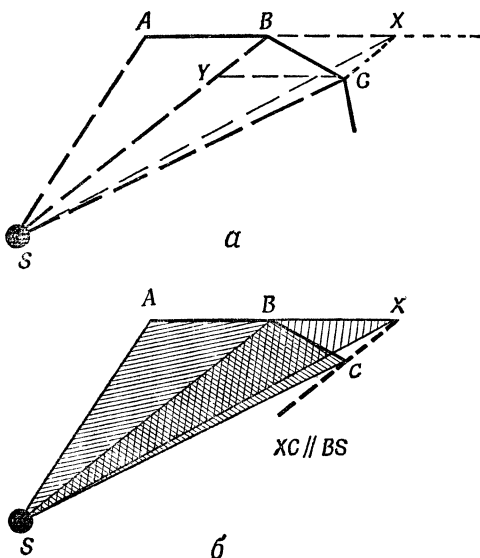
Изобразим скорость планеты вдоль прямой AB отрезком AB . Тогда отрезок BX также будет равен этой скорости, а отрезок BC будет соответствовать новой скорости планеты, направленной по



Фиг. 156. Повторение фиг. 155 для скоростей.

Масштаб выбран таким, чтобы AB или BX равнялись начальной скорости вдоль AB , до ее изменения под действием силы притяжения в точке B .

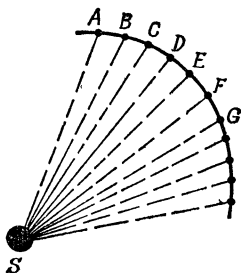
прямой BC (так как все отрезки равны расстояниям, проходимым за равные промежутки времени). Пользуясь этим масштабом, мы можем построить векторную диаграмму (фиг. 156), выражающую записанные выше уравнения. Пусть $BX (=AB)$ — начальная скорость до воздействия усилия, а BC — конечная скорость после воздействия. Изменение скорости будет равно вектору BY , направленному по линии BS в сторону точки S . Построив параллелограмм с диагональю BC , получим требуемый результат. Из свойств параллелограмма следует, что сторона XC параллельна BY , так что точка C лежит на линии, параллельной BS .



Фиг. 157. Повторение фиг. 154; точка C лежит на прямой XC , параллельной BY или BS (а); треугольники одинаковой площади заштрихованы (б).

Теперь рассмотрим треугольники SBC и SBX , представленные на фиг. 157. Они имеют одно и то же основание BS и находятся между параллельными прямыми, поэтому площади их равны. Площадь SBC равна площади SBX , которая в свою очередь равна площади SBA . Следовательно, треугольники SBA и SBC имеют одинаковую площадь. По аналогичным причинам треугольники

SBC и SCD тоже имеют равные площади. В конечном итоге все площади треугольников равны между собой и закон Кеплера для этого движения выполняется. При этом необходимо, чтобы усилие исходило из одной и той же точки S . Если теперь чаще прикладывать усилие (но соответственно меньшее по величине), мы получим орбиту, как на фиг. 158, близкую к гладкой кривой. При этом бу-



Фиг. 158. Уменьшение равных интервалов времени от A до B , от B до C .

Орбита близка к гладкой кривой. Когда орбита представляет собой гладкую кривую, каждый сегмент, перекрываемый за равные времена, можно рассматривать как малый треугольник. Следовательно, у всех сегментов должна быть одинаковая площадь.

дет соблюдаться и закон Кеплера, потому что сила направлена от планеты к Солнцу. Если прикладывать усилия еще чаще, то в пределе мы приходим к случаю непрерывной силы с орбитой в виде гладкой кривой. Это и доказывает справедливость второго закона Кеплера для гладкой криволинейной орбиты.

Второй закон Кеплера и момент количества движения

Ньютон пришел ко второму закону Кеплера, исходя из основных положений своей механики. Закон обратных квадратов для этого не требуется. Любое притяжение, направленное к Солнцу как центру, будет обеспечивать выполнение этого закона.

В современной механике эта задача представляет собой случай сохранения момента количества движения. Что такое момент количества движения ¹⁾ и почему мы уверены, что он сохраняется? Ниже дано краткое объяснение, слишком примитивное, чтобы быть убедительным, но имеющее целью дать общее представление об этом фундаментальном законе сохранения.

Прямолинейное движение описывается такими понятиями, как расстояние (s), скорость (v), ускоряющая сила (F),... законами и

¹⁾ Эту величину у вращающегося вокруг своей оси тела мы называем моментом вращения или просто спином в случае электрона, но для планет, вращающихся вокруг Солнца, применяется общий термин — момент количества движения. Такой термин применяется как для тел, вращающихся вокруг своей оси, так и для тел, движущихся по орбите.

соотношениями типа $F \cdot \Delta t = \Delta (Mv)$,,,, и такими принципами, как сохранение количества движения. Когда тело вращается, не совершая поступательного движения, мы можем применить законы Ньютона к каждой его движущейся части и составить эквивалентную схему. Вместо *пройденного расстояния* мы будем теперь иметь *угол поворота* (выраженный в радианах или числе оборотов). Вместо *линейной скорости* мы будем иметь дело с *угловой скоростью* (в оборотах в минуту или в радианах в секунду). Вместо *силы* будет фигурировать *момент силы*, равный произведению *силы* на *плечо*, — причина, заставляющая тело вращаться все быстрее и быстрее. Соотношению

СИЛА · ВРЕМЯ = ПРИРАЩЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ДВИЖЕНИЯ,

т. е. второму закону Ньютона, будет соответствовать

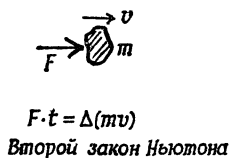
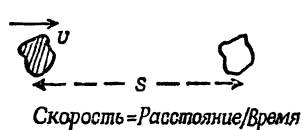
МОМЕНТ СИЛЫ · ВРЕМЯ = ПРИРАЩЕНИЕ МОМЕНТА
КОЛИЧЕСТВА ДВИЖЕНИЯ.

Задумайтесь над смыслом момента количества движения, и вы, вероятно, придете к правильному заключению: подобно тому как *момент силы* равен произведению *силы* на *плечо* ($F \cdot r$), *момент количества движения* равен *количеству движения*, умноженному на *плечо* ($Mv \cdot r$).

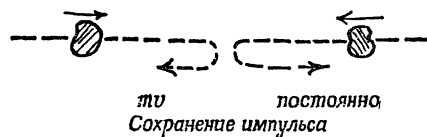
Умножьте F и Mv на плечо относительно выбранной оси, и вы получите вариант второго закона Ньютона для случая вращательного движения. Плечо — это *перпендикуляр*, проведенный от оси в направлении действия вектора силы или количества движения.

Предположим, что два невращающихся тела сталкиваются и в результате одно из них начинает вращаться. *Силы* взаимодействия тел равны и противоположно направлены (третий закон Ньютона); *плечо* относительно произвольной оси для этих сил будет одним и тем же. Поэтому моменты силы обоих тел относительно выбранной нами оси будут одинаковы по величине и противоположны по направлению. Приобретенный одним телом при столкновении момент количества движения будет равен по величине *моменту количества движения второго тела*, а их направления будут противоположными. Следовательно, полный момент обоих тел, приобретенный ими в процессе столкновения, равен нулю. Если одно тело начинает вращаться, другое тоже будет вращаться, но в противоположную сторону, вокруг той же оси. При *любом* столкновении или другом виде взаимодействия *момент количества движения сохраняется*, он может только передаваться без потерь или могут возникать *равные по величине и противоположные по направлению моменты количества движения*.

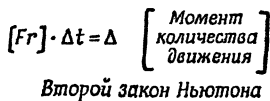
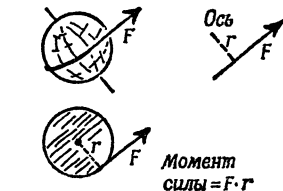
Прямолинейное движение



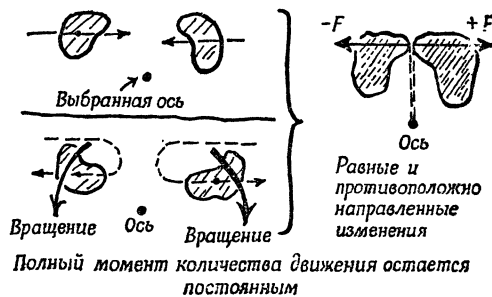
При любом столкновении



Вращательное движение

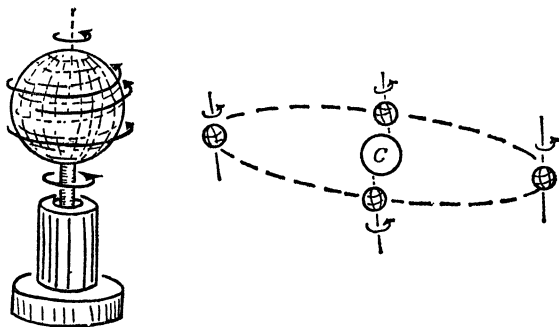


При любом столкновении



Фиг. 159. Вращение и столкновения.

Ввиду этого вращающееся изолированное тело (например, фигурист, вращающийся на одном коньке) не может изменить своего момента количества движения. Сумма произведений $Mv \cdot r$, относящихся к различным его частям, не может измениться. Предположим, что тело сжимается (фигурист сводит руки). Тогда величины r убывают для частей тела, приближающихся к оси вращения, и если полный момент остается постоянным, величина Mv должна возрасти — *тело начнет вращаться быстрее*. Понаблюдайте за фигуристом: независимо от его желания он вращается быстрее, если сводит руки или сгибает вытянутую ногу.

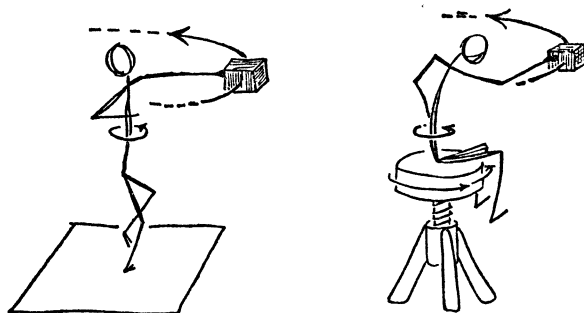


Фиг. 160. Момент количества движения вращающегося вокруг своей оси шара остается неизменным, если к нему не приложен момент внешней силы.

«Изолированное вращающееся тело не может изменить своего момента количества движения». Примените это положение к вращающейся Земле, к человеку на вращающемся без трения стуле. Превратитесь сами в «изолированное вращающееся тело»: начните вращаться, встав на одну пятку так, чтобы вы смогли повернуться несколько раз, прежде чем силы трения остановят ваше движение. (Еще лучше встать или сесть на табуретку, которая свободно вращается.) Возьмите тяжелую книгу и подержите ее на расстоянии вытянутой руки. Теперь, начав вращаться, прижмите книгу быстро к себе. Обратите внимание, как это отразится на вашей скорости. В этом случае момент количества движения сохраняется. Но здесь применим и второй закон Кеплера: книга — «планета», притягиваемая вами — «Солнцем» — во время ее вращения. (В этом опыте участвует ваша масса, которая имеет большую величину

ну, поэтому вы не сможете с достаточной точностью проверить закон Кеплера.)

Для реальной планеты притяжение Солнца не создает момента силы относительно оси, проходящей через Солнце, и, следовательно, не может изменить момент количества движения планеты относительно Солнца. На самом деле последний равен $Mv \cdot r$, где r — не «рычаг» Кеплера, а отрезок перпендикуляра, опущенного из центра Солнца на касательную к орбите (линию скорости). Когда планета приближается к Солнцу, r уменьшается и, чтобы Mvr было постоянным, v должна возрасть в той же самой пропорции.



Фиг. 161. Человек на вращающейся площадке увеличивает скорость вращения, когда приближает груз к оси.

Предположим, что за очень короткое время t планета проходит небольшой участок орбиты s со скоростью $v=s/t$. На этом участке момент количества движения планеты относительно Солнца равен $Mr (s/t)$, или $Ms r/t$. Но $s \cdot r$ равно произведению высоты на основание малого треугольника, который за время t описывает радиус-вектор. Эта величина равна удвоенной площади треугольника. Следовательно,

МОМЕНТ КОЛИЧЕСТВА ДВИЖЕНИЯ ПЛАНЕТЫ=

$$= \frac{\text{(МАССА } M) \text{ (ДВОЙНАЯ ПЛОЩАДЬ, ОПИСЫВАЕМАЯ РАДИУСОМ-ВЕКТОРОМ)}}{\text{ВРЕМЯ } t}.$$

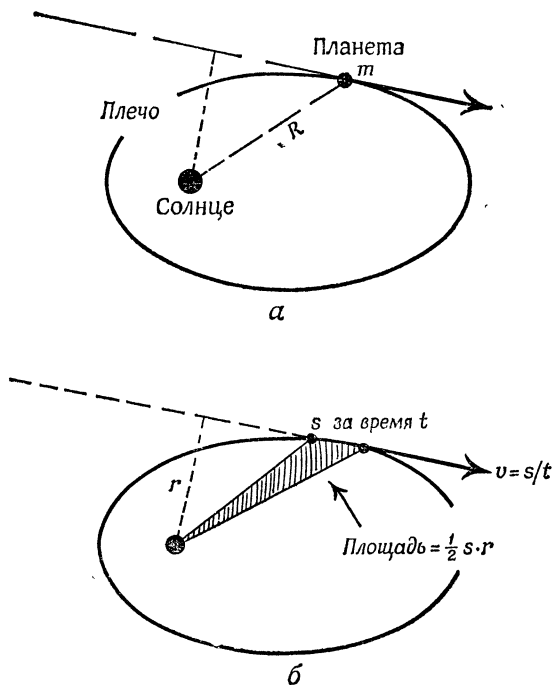
Для случая притяжения Солнцем отношение

$$\frac{\text{ОПИСЫВАЕМАЯ ПЛОЩАДЬ}}{\text{ВРЕМЯ}}$$

не меняется: согласно второму закону Кеплера, величина описываемой в единицу времени радиусом-вектором площади не может измениться. Следовательно, когда Кеплер открыл свой второй

закон, он показал лишь, что сила притяжения планет направлена точно к Солнцу и что не существует других сил, таких, как трение, обусловленное вязким эфиром.

Закон сохранения момента количества движения столь же универсален, как и другие законы сохранения механики — сохране-



Фиг. 162. Момент количества движения планеты
 $mvr = m \cdot (s/t) \cdot r = m$ (двойная площадь)/время.

ние массы, количества движения и т. д. В атомной физике мы называем его сокращенно *законом сохранения спина* и не сомневаемся в его справедливости даже в сложнейших взаимодействиях между частицами и излучением.

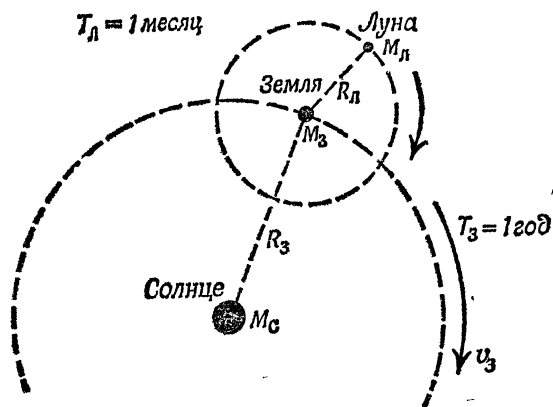
Плодотворная теория

Ньютон создавал свою теорию последовательно: сформулировал законы движения как исходные пункты разумных предположений, подкреплённых соображениями, полученными из экспери-

ментальных данных; затем получил следствия законов, такие, как законы Кеплера, а затем проверил эти выводы на опыте. В случае законов Кеплера эксперименты уже были сделаны. Наблюдения Тихо Браге были прекрасной проверкой, так что, когда Ньютон получил теоретические результаты, экспериментальная проверка теории уже была заранее готова. Не приходилось поэтому сомневаться в том, что теория «верна». Теория оказалась ценнее отдельных фактов. Она давала ясное и полное представление о движении планет, связывая его с таким привычным явлением, как падение тел. Вооруженный мощными математическими методами и руководимый великолепной интуицией, Ньютон применил свою теорию к большому числу задач, вошедших в его *Принципы*. Некоторые из этих задач рассмотрены ниже.

1. Определение массы Солнца и Земли

Ньютон вычислил массу Солнца, выразив ее в земных массах. [В то время масса Земли не была известна и не могла быть определена без измерений, подобных более поздним измерениям, проведенным Кавендишем (см. гл. 23).]



Фиг. 163. Вычисление отношения массы Солнца к массе Земли.

Вычисления могут быть выполнены следующим путем. (Индексы С, З и Л относятся к Солнцу, Земле и Луне соответственно.)

Для движения Земли по орбите вокруг Солнца:

$$G \frac{M_c M_z}{R_3^2} = M_z \frac{v_z^2}{R_3} = M_z \frac{4\pi^2 R_3^2}{R_3 T_3^2},$$

$$M_c = \frac{4\pi^2}{G} \left[\frac{R_3^3}{T_3^2} \right].$$

Обратите внимание, что масса Земли M_z сократилась,

Для движения Луны по орбите вокруг Земли:

$$G \frac{M_3 M_{\text{Л}}}{R_{\text{Л}}^2} = M_{\text{Л}} \frac{v_{\text{Л}}^2}{R_{\text{Л}}} = M_{\text{Л}} \frac{4\pi^2 R_{\text{Л}}^2}{R_{\text{Л}} T_{\text{Л}}^2},$$

$$M_3 = \frac{4\pi^2}{G} \left[\frac{R_{\text{Л}}^3}{T_{\text{Л}}^2} \right].$$

Вновь масса Луны $M_{\text{Л}}$ сократилась. Теперь, разделив одно уравнение на другое, получим

$$\frac{M_{\text{С}}}{M_3} = \left[\frac{R_3^3 / T_3^2}{R_{\text{Л}}^3 / T_{\text{Л}}^2} \right] = \frac{R_3^3}{R_{\text{Л}}^3} \frac{T_{\text{Л}}^2}{T_3^2} =$$

$$= \left[\frac{\text{РАССТОЯНИЕ ДО СОЛНЦА}}{\text{РАССТОЯНИЕ ДО ЛУНЫ}} \right]^3 \left[\frac{1 \text{ МЕСЯЦ}}{1 \text{ ГОД}} \right]^2.$$

Зная периоды и радиусы орбит, можно вычислить отношение масс Солнца и Земли.

II. Вычисление масс планет

Ньютону удалось оценить массы Юпитера и других планет, у которых есть спутники, в единицах массы Земли или Солнца. (Луна не имеет спутников, поэтому ее массу, которая сокращается в первом уравнении, определить не-легко.)

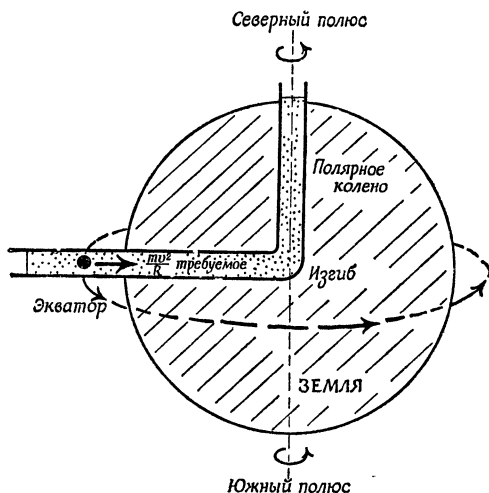
III. Величина g на экваторе

Из-за вращения Земли вокруг своей оси тело будет весить меньше на экваторе, нежели на полюсе, потому что часть его веса должна обеспечить центростремительную силу, удерживающую тело в движении по окружности вместе с поверхностью Земли. Тело, подвешенное на пружинных весах, будет удерживаться меньшей силой, чем сила, действующая на это тело со стороны Земли. Поэтому взвешивание на пружинных весах дает для веса тела меньшее значение, чем его истинный вес, на величину mv^2/R . Иными словами, напряженность поля силы тяжести Земли будет казаться меньше. Ньютон вычислил эту малую поправку к величине g , которую мы ныне можем наблюдать наряду с влиянием сфероидальной формы Земли.

IV. Несферичность формы Земли

Ньютон рассчитал отклонение формы Земли от сферы, исходя из следующих соображений. Предположим, что Земля вращалась так же, как и теперь, в те времена, когда она представляла собой полужидкую тестообразную массу. Какую форму она должна была принять? Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим такую схему. Трубка с водой проходит через Северный полюс к центру Земли и оттуда к экватору (фиг. 164). Каков будет уровень воды в трубке у экватора, если трубка заполнена водой так, что уровень воды у Северного полюса совпадает с поверхностью Земли? Давление воды на дне «полярной»

трубки обусловлено весом воды в этой трубке, и это давление передается через колено на дно другого колена трубки. Вес воды во втором колене заставляет воду опускаться. Но в «экваториальной» трубке обе эти силы не равны. Они должны различаться на достаточную величину, чтобы обеспечить направленную внутрь центробежную силу, действующую на воду в трубке, когда она вращается вместе с Землей вокруг земной оси. Поэтому вес воды в этом колене должен быть больше выталкивающего усилия со стороны «полярной» трубки на величину mv^2/R , а водяной столб в «экваториальной» трубке должен быть выше, чем в «полярной». «Экваториальная» трубка должна возвышаться над поверхностью Земли, чтобы в ней уместилось дополнительное количество

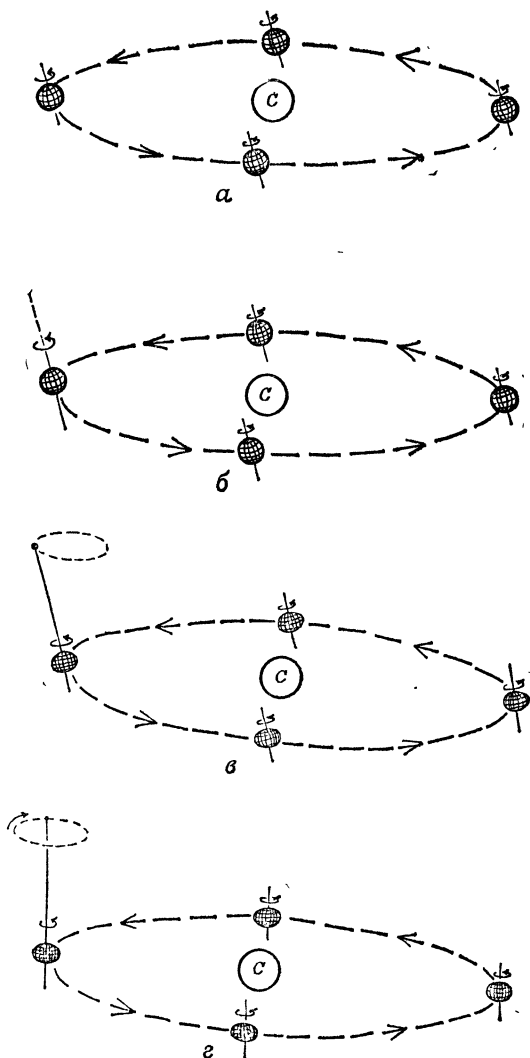


Фиг. 164. К оценке экваториальной выпуклости Земли.

воды. Ньютон вычислил эту дополнительную высоту, оказавшуюся равной 24 км, и пришел к выводу, что на ранней стадии существования Земли, когда она была тестообразной, на экваторе образовалась выпуклость примерно такой величины. Спустя короткое время измерения размеров Земли подтвердили этот вывод. У Юпитера этот эффект выражен более четко.

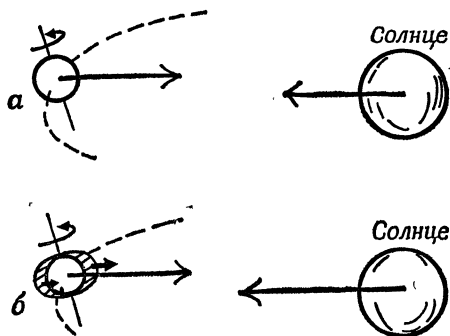
V. Прецессия

Ньютон так объяснил прецессию равноденствий: ось вращения Земли описывает конус, ибо Солнце и Луна притягивают экваториальную выпуклость Земли. Земная ось наклонена к плоскости эллиптической орбиты Земли, поэтому экваториальная выпуклость приводит к несимметричному притяжению Солнцем и Луной. Мы остановимся здесь на эффекте, связанном с притяжением Солнцем. Сферическую Землю Солнце притягивало бы равномерно, как если бы вся масса Земли была сосредоточена в ее центре. Равнодействующая сила в этом случае должна быть направлена по прямой, соединяющей центры Земли и Солнца, независимо от того, вращается Земля или нет (фиг. 166, а). Сфероид с экваториальной выпуклостью подвергается дополнительным воздействиям, приложенным к выпуклости (фиг. 166, б). Эти малые дополнительные



Фиг. 165. Прецессия равноденствий.

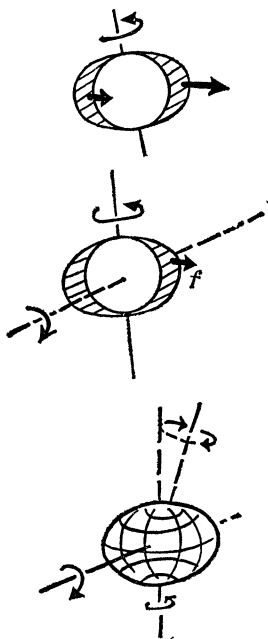
а — шарообразная Земля не прецессировала бы, даже совершая суточное вращение; б — через сотни лет Земля вращалась бы по своей орбите с тем же наклоном; в — прецессия сплюсненной Земли; г — через несколько столетий ось вращения повернется по поверхности конуса прецессии.



Фиг. 166. Прецессия.

a — Солнце притягивало бы сферическую Землю с силой, действующей по линии, соединяющей центры Земли и Солнца, независимо от того, вращается Земля или нет; *b* — Солнце притягивает неравномерно выпуклости сплюсненной Земли.

силы не равны — большее притяжение испытывает часть, обращенная к Солнцу (фиг. 167). Дополнительные силы эквивалентны среднему притяжению всей выпуклости, направленному по линии, соединяющей центры, *плюс* небольшая сила *f*, которая как бы качает земную ось. Так как земная ось наклонена, эта сила направлена от центра под углом. Угол между земной осью и дополнительной силой больше всего отличается от прямого в середине лета и в середине



Фиг. 167. Солнце притягивает ближайшую часть выпуклости сильнее, чем отдаленную.

Эти малые дополнительные силы равноценны некоторому добавочному притяжению, направленному по линии, соединяющей центры Солнца и Земли, и небольшой добавочной силе *f*, которая стремится опрокинуть земную ось.

Как и в любом случае вращения тела вокруг собственной оси, действие какой-либо силы, стремящейся наклонить ось вращения, сводится не к наклону оси, а к возникновению прецессии вокруг другой оси.

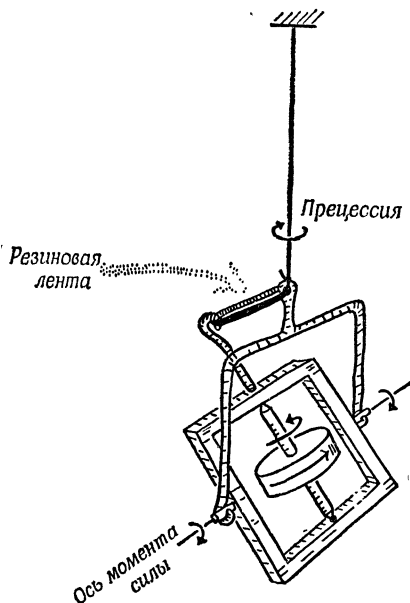
зимы. Когда такая сила действует на вращающееся тело, она не опрокидывает его, как можно было бы ожидать. Возникает очень интересное движение, называемое *прецессией*; вы можете его наблюдать, наклонив ось быстро вращающегося волчка. В этом случае сила тяжести, действующая на волчок, не опрокидывает его, а заставляет ось вращения волчка описывать конус. Ньютон показал, что притяжение Солнца и даже в большей степени Луны вызывает прецессию земной оси по конусу с углом раствора $23\frac{1}{2}^\circ$ с периодом 26 000 лет (фиг. 167). Наконец было дано объяснение прецессии. Ее наблюдали еще греки, затем пытался объяснить Коперник, но явление осталось совершенно необъяснимым до Ньютона. Это движение казалось таким непонятным, что почти не было надежды найти ему простое объяснение. Однако Ньютон показал, что это еще одно из проявлений всемирного тяготения: вращающаяся вокруг оси Земля прецессирует подобно волчку.

ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ОПЫТ

На фиг. 168 показан опыт, иллюстрирующий земную прецессию. Рама с быстро вращающимся махо-

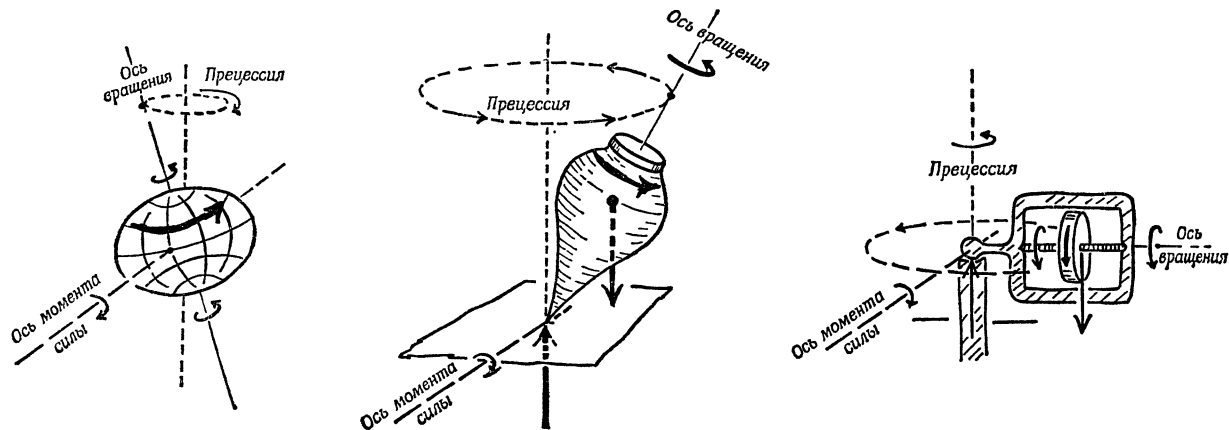
лесо продолжает вращаться, не совершая каких-либо движений. Если прикрепить резиновый шнур, кото-

Фиг. 168. Опыт, иллюстрирующий прецессию Земли.



виком подвешена на длинной веревке. Веревка и рама позволяют маховику свободно вращаться относительно вертикальной или горизонтальной оси. Наклоненное вращающееся ко-

лый тянул бы раму, опрокидывая вращающееся колесо относительно горизонтальной оси, то колесо начнет прецессировать вокруг вертикальной оси (веревки).

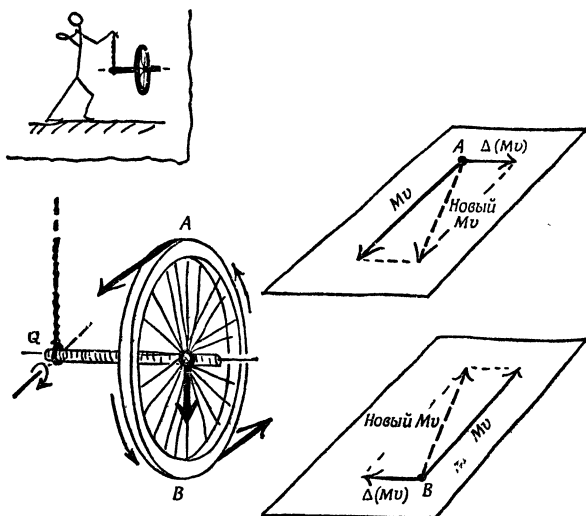


Фиг. 169. Земля, волчок и гироскоп — все прецессируют одинаково, по одной и той же причине.

Приведенные на рисунке слова «ось момента силы» означают, что, действуя относительно этой оси, сила стремится опрокинуть вращающееся тело.

Объяснение прецессии гироскопа

Земля, вращающийся волчок и «чудесный» гироскоп — все прецессируют одинаково, по одной и той же причине (фиг. 169). Прецессия кажется необъяснимой, однако это всего лишь сложный пример применения законов Ньютона к вращательному движению тел. При отсутствии нецентральных сил момент количества движения тела остается неизменным по величине и по направлению. Если существует нецентральная сила, создающая опрокидывающий момент, то, складывая моменты количества движения как векторы, можно показать, что ось будет прецессировать. Этот вопрос рассматривается во многих книгах,



Фиг. 170. Прецессия как случай движения, описываемого вторым законом Ньютона.

Здесь дается простое объяснение того, что прецессия — прямое следствие второго закона Ньютона. На фиг. 170 представлено большое велосипедное колесо с массивным ободом, подвешенное на тросе PQ и совершающее прецессию. Рассмотрим количество движения элемента колеса A . Этот элемент движется вперед, но вес, опрокидывая колесо, перемещает A вправо, сообщая A некоторое количество движения вправо. Это количество движения складывается с основным, направленным вперед, так что результирующее количество движения элемента A будет направлено вперед и немного вправо. Аналогично, элемент B в нижней части колеса будет иметь количество движения, направленное назад и немного влево. Для того чтобы элементы A и B обладали такими количествами движения, колесо должно вращаться относительно вертикальной оси, т. е. совершать прецессию. Здесь проявляется механизм прецессии, но распространить это рассмотрение на другие части колеса оказывается очень сложно.

VI. Движение Луны

Луна испытывает многочисленные возмущения, отклоняющие ее от равномерного кругового движения. Прежде всего она движется по кеплеровскому эллипсу, как любой спутник, в одном из фокусов которого находится Земля. Но эта орбита испытывает небольшие вариации за счет притяжения Солнцем¹. При новолунии Луна находится ближе к Солнцу, чем полная Луна, появляющаяся на две недели позднее; эта причина изменяет притяжение, что ведет к замедлению и ускорению движения Луны в течение месяца. Этот эффект увеличивается, когда зимой Солнце ближе, так что наблюдаются и годовые вариации скорости движения Луны. Кроме того, изменения солнечного притяжения меняют эллиптичность лунной орбиты; лунная орбита отклоняется вверх и вниз, плоскость орбиты медленно вращается. Ньютон предвидел эти эффекты в движении Луны и по возможности делал оценки их величин. Некоторые эффекты наблюдались уже давно, в некоторых следовало еще разобраться, и Ньютон просил королевского астронома провести измерения; ряд измерений был осуществлен много позже. Эллиптическая орбита поворачивалась в собственной плоскости со скоростью 3° в месяц, а первое вычисление Ньютона давало значение только $1\frac{1}{2}^\circ$. В течение многих лет после Ньютона математики решали эту проблему, стараясь объяснить расхождение. Они пытались даже заменить закон обратных квадратов законом обратной пропорциональности третьей степени. Наконец одному из них удалось обнаружить, что Ньютон незаконно пренебрег некоторыми членами в своих выкладках и что если их учесть, то теория будет согласоваться с экспериментом. Еще позднее в бумагах Ньютона были найдены правильные вычисления; из них стало ясно, что Ньютон сам обнаружил допущенную ошибку и получил правильный результат. Таким образом, Ньютон показал, что отмеченные нерегулярности в движении Луны вызваны всемирным тяготением. Он не разработал во всех деталях вопрос о солнечном притяжении, движение Луны осталось сложной проблемой, которая разрабатывается со все возрастающими подробностями и до наших дней. Идеальный метод решения проблемы — наиболее общий: лечить болезнь, а не каждый из ее симптомов отдельно, т. е. попросту рассчитать траекторию Луны в сложном поле силы тяжести Земли и Солнца. Это знаменитая «проблема трех тел»: три большие массы находятся в пространстве и обладают данными начальными скоростями; нужно определить их движение в дальнейшем. Эта проблема выглядит простой, если ее решать по частям, однако полное ее решение пока получить не удалось.

VII. Приливы и отливы

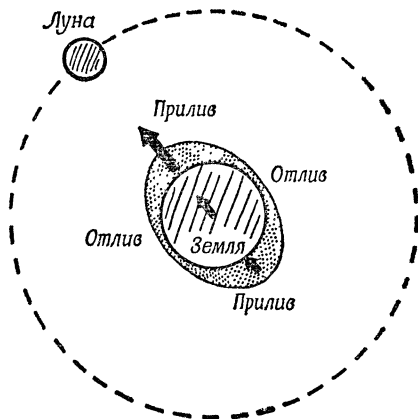
Океанские приливы и отливы долгое время оставались загадкой, объяснить которую, казалось, можно было бы, установив их связь с движением Луны. Однако люди считали, что такая связь реально существовать не может, и даже Галилей осмелел эту идею. Ньютон показал, что приливы и отливы обусловлены *неравномерным* притяжением воды в океане со стороны Луны. Центр лунной орбиты не совпадает с центром Земли. Луна и Земля вместе вращаются вокруг их общего центра масс подобно двум плохо подобранным партнерам, танцующим вальс. Этот центр масс находится на расстоянии примерно 4800 км

¹ Солнце оказывает сильное и почти постоянное воздействие на Луну; среднего притяжения достаточно, чтобы заставить Луну следовать за Землей по ее годовой орбите.

от центра Земли, всего лишь в 1600 км от поверхности Земли. Когда Земля притягивает Луну, Луна притягивает Землю с равной и противоположно направленной силой (третий закон), благодаря чему возникает сила Mv^2/r , вызывающая движение Земли вокруг общего центра масс с периодом, равным одному месяцу. Ближайшая к Луне часть океана притягивается сильнее (она ближе), вода поднимается — и возникает прилив ¹⁾. Находящаяся на большем

Фиг. 171. Океанские приливы и отливы обусловлены притяжением Луны.

Более сильное притяжение ближайшей к Луне части океана вызывает прилив. Малое действие притяжения на далекие от Луны части океана создает другую приливную волну.

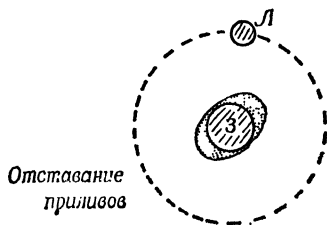


от Луны расстоянию часть океана притягивается слабее, чем суша, и на этой части океана также поднимается водяной горб.

Поэтому за 24 часа наблюдается два прилива. Вследствие вращения Земли движется и ее поверхность, тогда как приливные горбы, создаваемые притя-

¹⁾ Луна движется по своей орбите вокруг общего центра масс G , совершая полный оборот за месяц (фиг. 173). А поскольку она всегда повернута одной и той же стороной к Земле, то Земля также вращается, совершая оборот за месяц, что мог бы установить наблюдатель, покоящийся по отношению к неподвижным звездам. Но Земля все время обращена разными сторонами своей поверхности к Луне. В целом Земля совершает один оборот в месяц относительно G , но месячного вращения Земли не возникает. Наоборот, при движении вокруг G Земля сохраняет ориентацию, если не считать суточного вращения, которым мы здесь пренебрегаем. (Мы пренебрегаем различиями в величине g при переходе от экватора к полюсу. Эти различия вполне ощутимы, но заметно не сказываются на движении океанской воды, ибо океаны испытывают тот же эффект суточного вращения Земли, какой испытывала, согласно ньютоновским вычислениям, на раннем периоде своего существования тестообразная Земля; таким образом, значения g почти те же, что будут «размазывать» океаны равномерно по выпуклой у экватора вращающейся Земле. Иными словами, мы предполагаем, что суточное вращение придало Земле «равновесную форму» и что то же относится и к океанам.) Итак, все части Земли движутся по одинаковым окружностям, аналогично тому как совершает круговое движение рука человека, протирающего окно (см. фиг. 67, стр. 124). При этом каждая часть обладает одинаковым ускорением v^2/r , направленным в сторону Луны.

жением Луны и Солнца, остаются еще на месте, так что приливы поднимаются и опускаются над сушей, движущейся под ними. Вода океана движется вместе с Землей, а приливные горбы идут как волны от берега к берегу. В результате сложных процессов, вызываемых трением и инертностью водяных масс, приливные горбы задерживаются, поэтому приливной горб находится не точно под Луной, а отстаёт в среднем на $\frac{1}{4}$ суток. Солнце тоже вызывает приливы, хотя и не столь сильные, ибо большое расстояние до Солнца сглаживает *неодинаковость* притяжения. Два раза в месяц, когда солнечные и лунные приливы совпадают, наблюдаются особенно большие приливы. Когда



Фиг. 172. Отставание приливов.

В действительности приливные горбы отстают от Луны из-за инерции приливного трения, эффектов, связанных с вращением. Ввиду суточного вращения Земли приливы в большинстве мест на земном шаре отстают на 6 часов от Луны

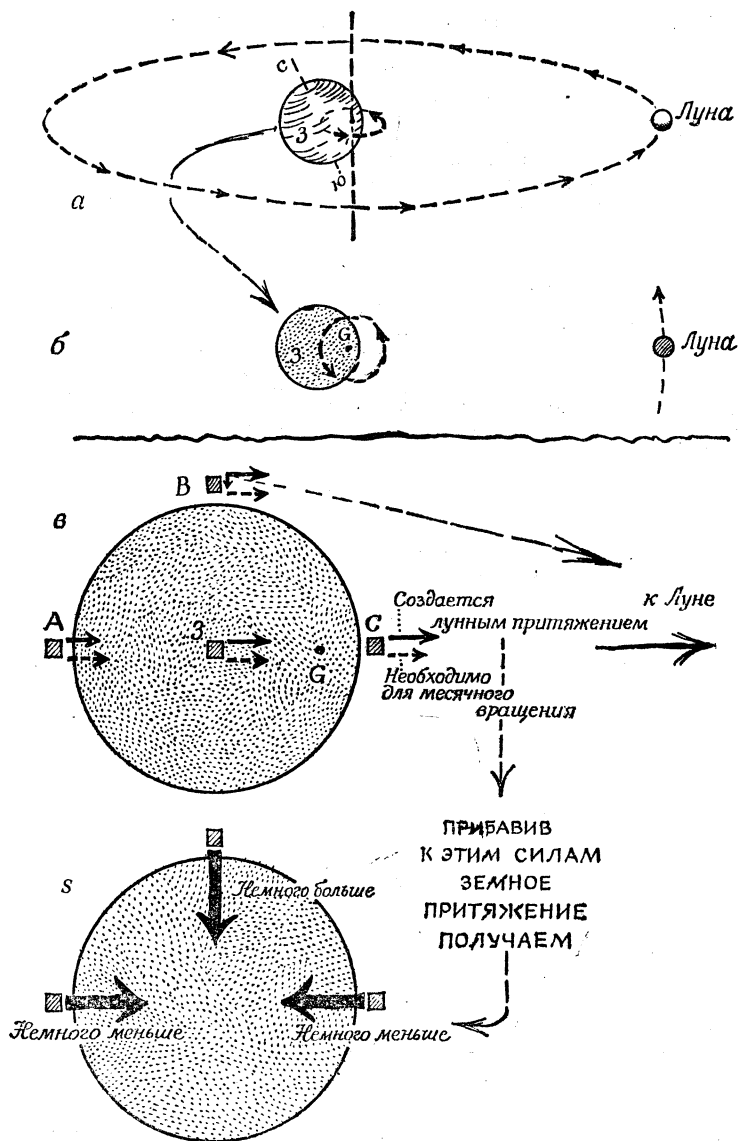
солнечный и лунный приливы приходят в противоположных фазах, наблюдаются малые «квадратурные» приливы.

Мы можем оценить «приливные силы», действующие на элемент вещества в разных частях Земли. Возьмем «элемент», который весит 30 000 000 *ньютонов* в любом месте на *поверхности* Земли ¹⁾. В *центре* Земли *З* земное притяжение, испытываемое этим «элементом», будет равно нулю (фиг. 173). Лунное притяжение создает силу $mv^2/(\text{радиус } 3G)$, соответствующую месячному движению элемента. Расчет показывает, что эта сила равна 100 *ньютонов*. Во всех других точках *A*, *B*, *C*, ... сила, действующая в направлении Луны, такая же — 100 *ньютонов*, но лунное притяжение равно 97 *ньютонов* в точке *A* и 103 *ньютонов* в точке *C*. Таким образом, радиальные притяжения, приходящиеся на элемент, будут равны:

- в *A*: 30 000 000 + 97, эта величина обеспечивает необходимые 100 *ньютонов* и еще остается 29 999 997 для эффективного *g*;
- в *B*: 30 000 000 + Вертикальная компонента лунного притяжения, которая имеет небольшой наклон. Эта компонента составляет 4000/240 000 от 100, или около 1,5. В этом случае эффективное *g* равно 30 000 001,5;
- в *C*: 30 000 000 (внутри) и 103 (наружу), что обеспечивает необходимые 100 *ньютонов* и еще остается (внутри) 29 999 997 для эффективного *g*.

Таким образом, в точках *A* и *C* элемент «легче», чем в точке *B*, — на него действует приливная сила, равная 4,5 *ньютонов*. Эта сила и порождает два горба, причем на каждые 3000 *т* приходится только 4,5 *ньютонов*.

¹⁾ Масса элемента = $3 \cdot 10^7 / 9,8 \approx 3 \cdot 10^6 \text{ кг} \approx 3000 \text{ т}$. Так что это 3000-тонный (размером с дом) кусок скалы или соответственный объем воды или даже воздуха,



Фиг. 173. Сила, вызывающая приливы.

VIII. Масса Луны

Сравнивая квадратурный и сизигийный приливы, мы можем разделить и сравнить действие Солнца и Луны ¹⁾. Это проделал Ньютон и смог таким образом оценить массу Луны по величине вызываемого ею прилива. Иными словами, у Луны имеется необычный спутник — океанский водяной горб, который мы называем *приливом*. В течение двух столетий непосредственно определить массу Луны было невозможно, пока человек не запустил спутники для ее изучения.

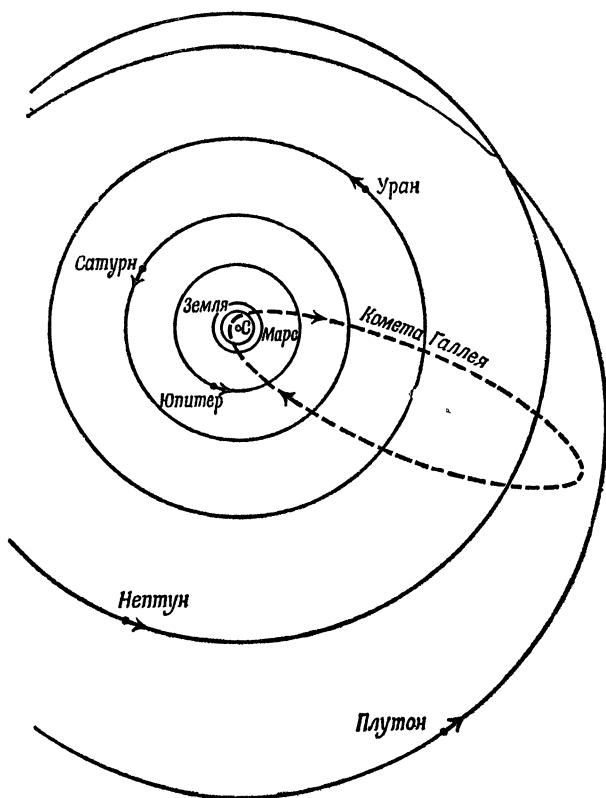
IX. Кометы

Ньютон раскрыл природу комет — этих гостей Солнечной системы, которые всегда вызывали интерес и даже священный ужас. (Довольно странно, что даже в наши дни в широкой печати кометы рассматриваются как мистические явления. Бульварная пресса не осмелится назвать затмение чудом, ибо это вызовет смех, но когда появляется видимая комета или даже слух о ней, многие газеты из этого делают сенсацию, сообщая о «чудесном событии на небесах». Это невежество сохранилось вместе с теми предрассудками, которые обеспечили астрологии существование на века.)

Тихо Браге и Кеплер показали, что кометы не «чудесные явления», а тела, пересекающие, как тогда думали, орбиты планет только один раз. Их можно видеть лишь потому, что они освещаются солнечным светом, и по той же причине их можно наблюдать, когда они находятся на небольших расстояниях от Земли. Ньютон показал, что кометы движутся по очень вытянутым эллиптическим орбитам, в одном из фокусов которых находится Солнце. Их движение определяется, как и движение планет, гравитацией. Но они имеют очень малую величину, и их орбиты обладают значительно большим эксцентриситетом, так что их можно видеть только тогда, когда они проходят вблизи Солнца. Кометы уходят далеко за пределы орбит самых далеких планет, все время замедляясь (второй закон Кеплера); наконец, изменив направление в «вершине» эллипса (первый закон Кеплера), они после долгого путешествия прилетают опять в нашу область, разворачиваются на максимальной скорости вокруг Солнца и снова удаляются. Эллиптическая орбита кометы может быть измерена, и время ее возвращения точно предсказано. Одна из наиболее знаменитых комет названа по имени ее открывателя — Галлея (Галлей познакомился с *Принципами* Ньютона, когда их еще печатали). Это первый пример удачного предсказания времени возвращения кометы, интервал между ее «визитами» оказался равным 76 годам. Ньютон как раз вовремя указал на одну из старых записей Кеплера и предсказал время будущих возвращений. Когда кометы возвратились точно в предсказанное время, они потеряли свою таинственность, но не потеряли своей славы. Их регулярное возвращение в предсказанные сроки позволяет проверить наши наблюдения и дает еще одно подтверждение за-

¹⁾ У берегов, где есть заливы и узкие горловины, приливы могут подниматься на большую высоту, а у островов, в открытом океане сизигийные приливы поднимаются только на 1,3 м; высота подъема квадратурного прилива вдвое меньше. Поэтому прилив, обусловленный Солнцем и Луной, достигает 1,3 м, а прилив, происходящий тогда, когда Солнце и Луна действуют в разные стороны, поднимается лишь на 0,6 м. Отсюда следует, что высота солнечного прилива 0,35 м, а высота лунного 0,95 м. Таким путем мы можем оценить отношение масс Луны и Солнца. Однако задача оказывается очень сложной.

кона всемирного тяготения. Можно проследить появление комет в прошлом. Например, комета Ньютона, которую он наблюдал в 1680 г., а возвращения которой можно ожидать в 2255 г., могла быть той самой кометой, которая, по преданиям, возвестила о гибели Юлия Цезаря.



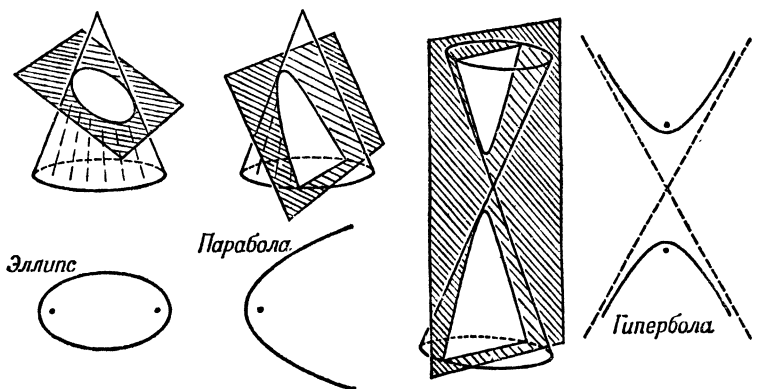
Фиг. 174. Схема Солнечной системы и комета Галлея.

Открытая самой последней, планета Плутон очень мала и движется по эллиптической орбите, простирающейся от орбиты Нептуна до очень больших расстояний. (Меркурий и Венера не показаны.)

В некоторых случаях комета испытывает сильное гравитационное возмущение, проходя вблизи больших планет, и переходит на новую орбиту с другим периодом. Вот почему мы знаем, что у комет масса невелика: планеты оказывают воздействие на их движение, а кометы не влияют на движение планет, хотя и действуют на них с такой же силой.

Если комета приходит из внешнего пространства с *очень большой скоростью*, она обходит Солнце и уходит в новом направлении, но движется не по эллипсу, а по гиперболе и в этом случае назад не возвращается ¹⁾.

¹⁾ Если мы зададим такой же вопрос, какой задавали Ньютону его коллеги: «Если принять закон обратных квадратов для притяжения, то по каким траекториям будут двигаться планеты и кометы?», то получим ответ: «Орбита будет коническим сечением, в одном из фокусов которого находится Солнце». Конические сечения — кривые, получающиеся при пересечении кругового



Фиг. 175. Конические сечения.

конуса плоскостями. Конус, пересеченный плоскостью, перпендикулярной его оси, даст *окружность*. Если плоскость, пересекающая конус, по отношению к его оси наклонена, то получается *эллипс*. Если наклон плоскости еще больше и она параллельна образующей конуса, то получается *парабола*. Сечение с еще большим наклоном плоскости дает *гиперболу*. Эти кривые принадлежат к одному математическому семейству. Их алгебраические уравнения сходны:

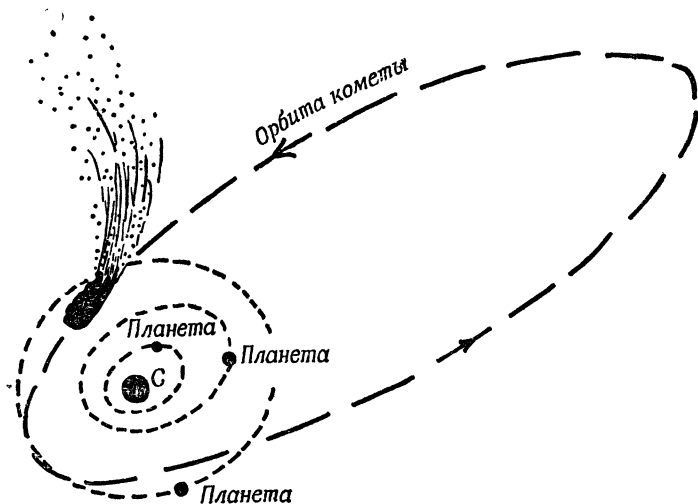
$$\text{Окружность: } x^2 + y^2 = 0,$$

$$\text{Эллипс: } \frac{x^2}{9} + \frac{y^2}{4} = 1,$$

$$\text{Гипербола: } \frac{x^2}{9} - \frac{y^2}{4} = 1.$$

Уравнение параболы выглядит по-другому (т. е. $x^2 = 9y$), но также связано с остальными. В физике мы встречаемся с эллипсом, изучая орбиты планет; все эти кривые встречаются среди орбит комет, а гиперболы — в том случае, когда атомное ядро бомбардируется α -частицами (α -частицы движутся по гиперболам). Измеряя рассеяние α -частиц на атомных ядрах, можно рассчитывать рассеивающие силы. Эти силы подчиняются закону обратных квадратов, действующему между α -частицей и ядром атома. Мы приходим к выводу, что эти силы есть результат электростатического отталкивания между электрическими зарядами. Из дальнейших измерений мы можем даже оценить электрические заряды атомных ядер. Это пример того, как механика Ньютона в наши дни помогает изучать атом.

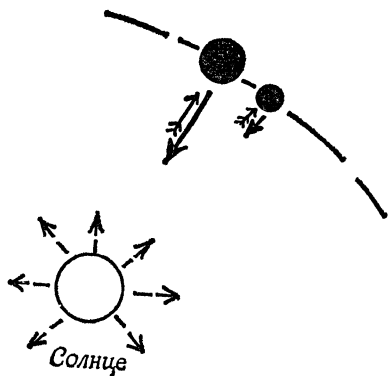
Кометы движутся так быстро и приходят так редко, что еще до сих пор ученые ждут момента, когда можно будет применить современные средства к исследованию большой кометы. Считают, что кометы состоят из камней, пыли, газа и т. д., движущихся совокупно. Приближаясь к Солнцу, они все сильнее и сильнее отражают свет и кажутся все ярче и ярче. Когда комета проходит очень близко от Солнца, она может сильно нагреться и начать испускать



Фиг. 176. Комета, движущаяся по эллиптической орбите, в одном из фокусов которой находится Солнце, проходит через Солнечную систему.

собственное излучение. Излучение Солнца вызывает испарение вещества некоторых комет; рассеиваемый дополнительно на парах свет делает кометы более яркими и как бы увеличивает их объем. У многих комет образуется «хвост» из яркого вещества, который следует за кометой и изгибается, отклоняясь от ее орбиты в сторону от Солнца. Почему хвост не движется вместе с остальными частями кометы? Тело комет состоит из отдельных частиц, но тем не менее все они движутся по общей орбите, так как солнечное притяжение пропорционально массе (вспомните символический эксперимент). Хвост — исключение. Он не движется вместе с остальной массой кометы и даже отклоняется в сторону. Из этого можно заключить, что существует отталкивающая сила между Солнцем и кометой, причем эта сила действует на хвост *сильнее, нежели на остальные части*. Хвост скорее всего состоит из мельчайших частичек пыли, а может быть, только из газообразного вещества. Почему на маленькие частицы действуют относительно большие силы, чем на большие? Поверхностное натяжение, внутреннее трение жидкости и некоторые другие силы изменяются пропорционально *поверхности* частицы, тогда как гравитационные силы пропорциональны *массе*, а значит — *объему*. Наиболее вероятно, что «поверхностными силами», действующими на кометную пыль, являются дав-

ление света и поток ионов, испускаемый Солнцем. Уменьшение линейного размера частицы в 10 раз ведет к уменьшению ее массы в 1000 раз, а поверхность при этом становится меньше только в 100 раз, поэтому относительное значение поверхностных сил по сравнению с гравитационным притяжением



Фиг. 177. Силы, действующие на частицы хвоста кометы.

Влияние давления света пропорционально площади поверхности; гравитационное притяжение пропорционально массам притягивающихся тел.

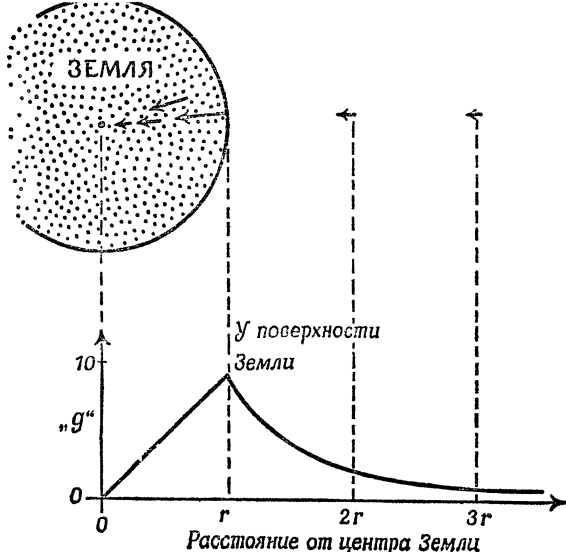
массы становится в 10 раз больше. Вблизи Солнца его световое излучение очень велико, кроме того, оно испускает потоки протонов, и давление на небольшие частицы начинает играть важную роль. Вероятно, именно поэтому хвост кометы отталкивается от Солнца.

Х. Сила тяжести внутри Земли

С помощью интегрального исчисления Ньютон показал, что пустая материальная оболочка сферической формы притягивает находящуюся вне ее массу так, как если бы вся масса оболочки была сосредоточена в центре сферы. Представив себе, что Земля состоит из концентрических оболочек (даже различной плотности), Ньютон смог прийти к заключению, что и Земля притягивает другие тела так, как будто вся ее масса сосредоточена в ее центре. Ньютон также показал, что помещенное в такую оболочку тело *не испытывает на себе действия сил*. Этот результат не имеет большого значения для толкования земного тяготения, хотя и очень важен в теории электричества, ибо позволяет осуществить превосходную проверку закона обратных квадратов для электрических зарядов. Об этом будет сказано подробнее в гл. 33 ¹⁾.

Эти два результата, полученные для сферической оболочки, дают интересную картину гравитационного поля однородного шара. Вне его поле спадает по «закону обратных квадратов»: g изменяется как $1/R^2$, где R — расстояние от центра. Если поместить тело *внутри* шара, то оно окажется как бы внутри оболочки, притяжение которой на него не действует. Тело остается как бы на поверхности внутреннего шара. У него меньшая масса, но оно находится ближе к центру. В результате внутри шара g изменяется пропорционально R .

¹⁾ Гл. 33 («Электростатика. Электрические заряды и поля») входит в т. 3 настоящего издания.

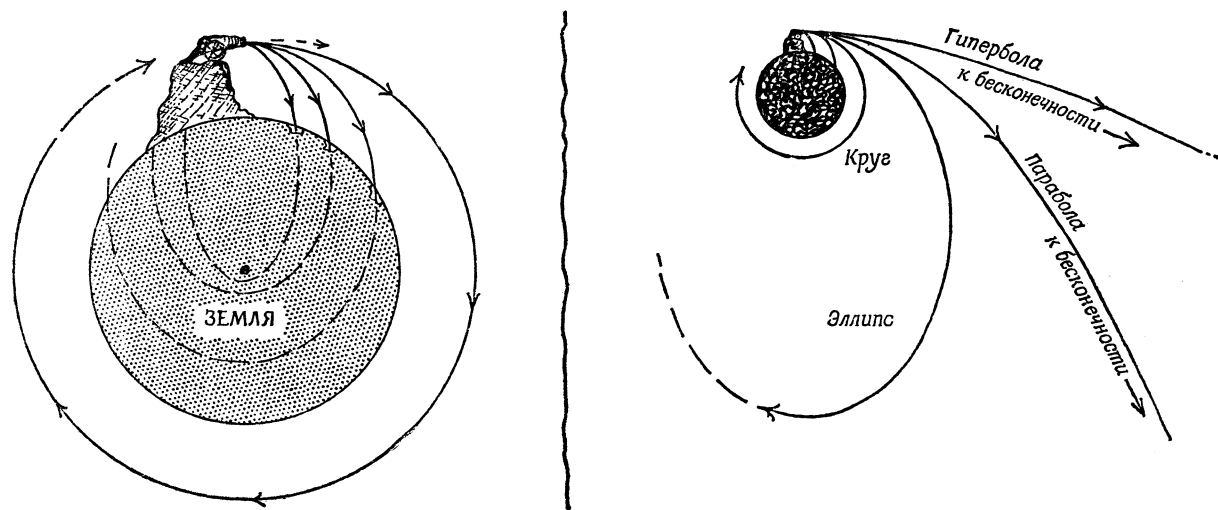


Фиг. 178. Определение величины g .

XI. Искусственные спутники

Ньютон указал, что любой снаряд является спутником Земли. Допустим, что из пушки, стоящей на вершине горы, горизонтально выпущен снаряд. Медленно летящий снаряд падает на Землю по параболе, фокус которой расположен близко к вершине. В действительности траектория снаряда представляет собой эллипс, второй фокус которого находится в центре Земли. Парабола и эллипс неразличимы на малом участке траектории, наблюдаемой, пока снаряд еще не упал. (Чтобы получилась действительно парабола, нужна большая, плоская «Земля», а не шарообразная, с постоянным значением g .) Более быстрый снаряд полетит по эллипсу, но с малым эксцентриситетом. Можно придать снаряду такую скорость, что он будет вращаться вокруг Земли подобно Луне, обходя Землю по круговой орбите многократно (при условии, что стрелявший человек освободит дорогу «маленькой луне», после того как произведет выстрел). Такова картина движения искусственного спутника, полученная Ньютоном. Для спутника Земли и Луны будет справедлив третий закон Кеплера.

Если снаряд летит со скоростью, превышающей ту, которая соответствует движению по круговой орбите, то его траектория будет представлять собой эллипс, ближайшим фокусом которого является центр Земли. Если снаряд будет лететь быстрее, его траектория превратится в огромную параболу. Если его скорость еще больше возрастет, то он будет двигаться по гиперболе и покинет Землю навсегда. Скорость, необходимую для такого «бегства», можно рассчитать. Такой расчет очень важен для космических полетов и уже давно применяется при определении скорости молекул газа, покидающих атмосферу Земли.

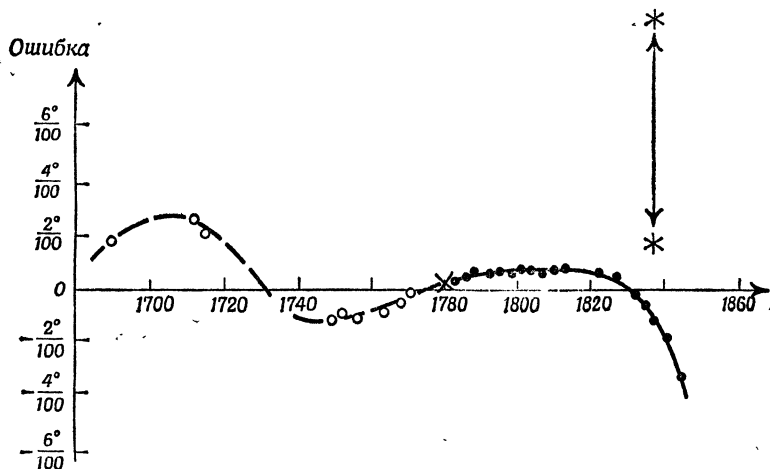


Фиг. 179. Орбиты спутников Земли (по рисунку Ньютона).

Когда эллиптические орбиты проходят через Землю, они показаны так, как если бы вся масса Земли была сосредоточена в ее центре. Поэтому на них как бы не распространяется уменьшение силы тяжести внутри земного шара.

XII. Возмущения движений планет. Великое открытие

Движением планет управляет в основном Солнце, но другие планеты, подчиняющиеся закону всемирного тяготения, тоже создают небольшие силы, «возмущающие» простое движение. Ньютон изучал эти возмущения. Например, большая планета Юпитер притягивает соседний Сатурн, в результате чего наблюдаются заметные изменения орбиты Сатурна. Направление притяжения



Фиг. 180. Оставшиеся «необъясненными» возмущения Урана (в период от 1650 до 1850 г.).

Крестиком отмечено открытие Гершелем Урана. Зная орбиту Урана, астрономы обнаружили, что Уран наблюдался и был зарегистрирован как звезда несколько раз. Эти даты обозначены полными кружочками. Стрелкой указано минимальное расстояние между звездами, видимое невооруженным глазом.

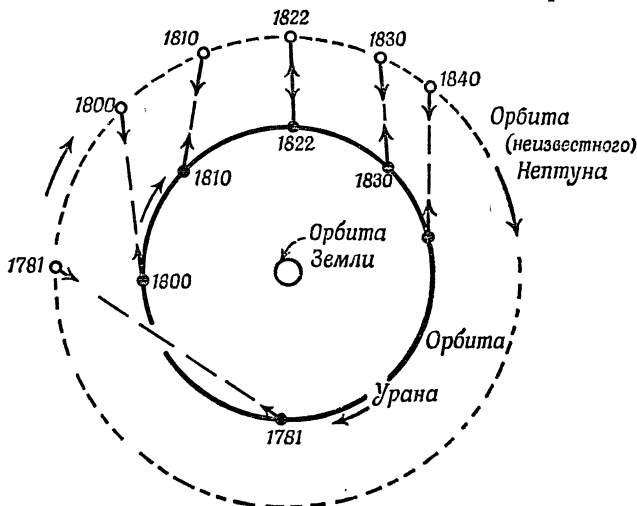
изменяется, так как Юпитер и Сатурн движутся по своим орбитам. Притяжение между ними значительно изменяется также и по величине, когда межпланетное расстояние меняется от минимального до максимального¹⁾. Это взаимодействие влияет на силу тяжести и вносит в движение планет изменения, которые, накапливаясь, в свою очередь несколько изменяют орбиты. Ньютон оценил этот эффект и показал, что полученные результаты соответствуют наблюдаемым особенностям движения Сатурна. Однако общее решение проблемы — весьма сложная задача, и Ньютон положил лишь начало ее исследованию.

Исследование возмущений движения планет на первый взгляд похоже на возню с мелкими деталями; между тем спустя столетие подобного рода исследования привели к выдающемуся успеху — открытию новой планеты. До это-

¹⁾ Расстояние между ними изменяется от величины, равной сумме радиусов орбит, до величины, равной их разности: 1400 млн. км — 770 млн. км (1400—770); отношение этих величин 3,5 : 1. Это вызывает возмущающее притяжение, меняющееся в отношении 1 : 12.

го первая планета, кроме пяти планет, известных еще Копернику, была открыта с помощью телескопа. В 1781 г. Гершель заметил звезду, которая была больше соседних звезд и двигалась по отношению к ним, что и доказывало, что это планета. Новую планету назвали Ураном. Она была удалена от Земли на вдвое большее расстояние по сравнению с Сатурном, а радиус ее орбиты и период обращения соответствовали третьему закону Кеплера.

Продолжавшееся изучение Урана позволило обнаружить небольшие отклонения от кеплеровской орбиты. Некоторые из них можно объяснить возмущениями, вносимыми Сатурном и Юпитером. Однако некоторая необъяснимая



Фиг. 181. Возмущающие движение Урана силы, обусловленные Нептуном.

Показано положение планет в разные годы. До 1822 г. притяжение Нептуна ускоряло движение Урана по его орбите, так что он приходил в точку наблюдения несколько раньше, чем это ожидалось. После 1822 г. притяжение Нептуна замедляло движение Урана.

ошибка оставалась. По данным 1820 г. она составляла всего $\frac{1}{100}^\circ$. Одни астрономы сомневались в точности закона обратных квадратов, другие высказывали предположение о существовании еще неизвестной планеты, возмущающей Уран. Это было остроумным предположением, но ставило почти неразрешимую проблему. Несмотря на это, два молодых математика, Адамс в Англии и Леверье во Франции, решили определить положение этой гипотетической планеты. Очень сложно рассчитать взаимодействие двух известных планет, а здесь была обратная задача, да еще речь шла о планете, о которой ничего не было известно: ни ее масса, ни расстояние, ни направление движения. Все это нужно было найти по незначительным отклонениям Урана от кеплеровской орбиты.

Адамс начал работать над этой проблемой, как только оставил студенческую скамью. Двумя годами позднее он написал королевскому астроному, сообщая ему, где следует искать новую планету. Точность вычислений Адамса лежала в пределах 2° , по королевский астроном не придал большого значения письму

Адамса и запросил у него дополнительные данные. В те времена, как, впрочем, и теперь, профессиональных ученых забрасывали письмами эксцентричные энтузиасты, поэтому к такого рода письмам выработалось несерьезное отношение.

В то же время над проблемой совершенно независимо работал Леверье. Он изучил несколько гипотез и остановился на том, что существует неизвестная планета, и в конечном итоге пришел к результату, близкому к полученному Адамсом. Он тоже написал королевскому астроному, и только тогда последний начал тщательное, но медленно подвигавшееся исследование. К этому времени другие астрономы начали верить в возможность того, что «мы видим ее (планету), как Колумб видел Америку с берегов Испании». Леверье написал еще директору Берлинской обсерватории, который произвел наблюдения в указанном направлении, сравнил свои наблюдения с новой звездной картой и обнаружил новую планету! Открытие обошло весь мир и было подтверждено во всех обсерваториях. Эту новую планету, открытую на основе теоретического расчета, называли Нептуном.

Методы Ньютона

Ньютон изложил свои астрономические исследования в *Принципах*. Он использовал метод *дедукции* для получения большого числа выводов из нескольких законов, но его трактовка существенно отличалась от дедуктивных методов греков и их последователей. Ньютон создал свою теорию на основе предположений, вытекающих из эксперимента, затем получил из теории следствия, а уже потом проверил, насколько мог, эти следствия экспериментально. Поэтому его теория была связана с действительностью экспериментом и четкими определениями, она могла предсказывать явления, которые в свою очередь проверялись опытом. Теория Ньютона «объясняла» множество чудес, сводя их к обычным уже известным явлениям.

Преемники Ньютона исказили его точку зрения на гравитацию. Они полагали, что Ньютон трактовал ее как «действие на расстоянии», как чудесную силу, мгновенно действующую в вакууме, в отличие от декартова пространства, заполненного вихрями, которые передают силу и движение. Ньютон попросту считал, что обратно пропорциональное квадрату расстояния силовое поле позволяет объяснить законы Кеплера и многие другие явления. Для этого ему не нужно было знать, как передается сила. Он прямо говорил о том, что *причина* тяготения ему неизвестна. Он предполагал, что тяготение должно быть некоторым видом воздействия, исходящего от каждого материального тела и пронизывающего каждое другое тело, но это было лишь описанием наблюдаемых свойств. Ньютон подчеркивал, что он не знает их первичной причины. «*Hypotheses non fingo*» — «Я не измышляю гипотез», —

писал он однажды в раздражении. Он не желал вводить лишние детали в описание природы и не пытался высказывать предположения, которые *не могли бы быть проверены*. Однако в последних работах он высказал много остроумных догадок о природе света, строении атома и даже о механизме гравитации.

Обычно Ньютона описывают как холодного, логически мыслящего, лишенного эмоций гения, который создал стиль современной науки. Но один из его биографов, лорд Кейнес, изучивший многие рукописи Ньютона, обнаружил, что Ньютон был затворником, толковавшим природу мистически.

«Ньютон не был первым человеком века рационализма. Он был последним магом, последним из вавилонян или шумеров, последним великим умом, который взглянул на вещественный и интеллектуальный мир теми же глазами, что и люди, начинавшие создавать наше интеллектуальное наследство не менее чем 10 000 лет назад. Исаак Ньютон, ребенок, родившийся после смерти отца, в день Рождества Христова в 1642 г., стал любимцем богов»¹⁾.

Ньютон сам чувствовал себя волшебником, разгадавшим божественную тайну Солнечной системы, используя записи с результатами измерений, опыты, которые должны были быть сделаны, сказания и даже просто догадки, внушенные древним авторам самим богом и содержащиеся в их трудах. Он преуспел в раскрытии тайн природы благодаря своему необычному дару упорно сосредоточиваться на интересующей его проблеме, «его сила интуиции была одной из самых замечательных, которой человек когда-либо был одарен». Не мог ли он таким же путем объяснить поведение материи и человеческого мышления, показать движение времени от сотворения мира до его конца? Этот потрясающий ум стремился, насколько его понял Кейнес, быть вместе «и Коперником и Фаустом». Все биографы, начиная от современников и кончая Кейнесом и Эйнштейном, считали Ньютона величайшим математиком из существовавших за последнее тысячелетие.

Идеи Ньютона

Как творец науки Ньютон создал новый стиль, который до сих пор еще сохраняет свое значение. Как научный мыслитель он представляется выдающимся основоположником идей. Новые

¹⁾ J. M. Keynes, Newton the Man, в кн. Newton Tercentenary Celebrations of The Royal Society of London, Cambridge, 1947.

идеи рождались у него гораздо чаще, чем это можно было бы объяснить простой удачей. Он сформулировал законы движения, которыми мы пользуемся поныне и которые мы считаем очень точным приближением к действительности. Ньютон пришел к замечательной идее всемирного тяготения. На основании скудных данных ему удалось оценить массу Земли, хотя эту оценку в те времена проверить было невозможно. Только после опытов Кавендиша Земля была «взвешена». Для своей оценки Ньютон предположил, что плотность твердых тел не может быть меньше плотности воды. Плотность же центральных частей Земли должна быть больше, чем горных пород, находящихся на поверхности. Исходя из этого, Ньютон предположил, что средняя плотность земного вещества в 5 или 6 раз превосходит массу водяного шара такого же размера (а по современным измерениям — в 5,5 раз!). Ньютон создал теорию световых волн, объяснявшую и свойства световых лучей, и интерференцию в тонких пленках (открытую и изученную им). Это была удивительная теория, в которой считалось, что свет состоит из частиц, сопровождаемых волнами, и которая объясняла на основе этого представления законы распространения света. Через сто лет волновая теория заменила корпускулярную и дискредитировала ее. Многие годы теория света Ньютона вызывала улыбку ученых. Теперь, двести лет спустя, наука располагает четкими доказательствами того, что свет *сочетает* в себе свойства и волн и корпускул. Ныне мы придерживаемся теории, удивительным образом напоминающей ньютоновскую! Еще раз возникшая у него идея оказалась правильной.

Я не думаю, что появление замечательных идей, характерное для Ньютона и других великих людей, связано с их сверхъестественной интуицией, чудесным вдохновением или сопутствующей им особой удачей. Полагаю, что появление идей у Ньютона объясняется его огромными познаниями, большой гибкостью ума, умением собирать и обрабатывать случайные данные и использовать другие явления, открытые всем, но слишком скоро забываемые рядовым человеком. Интуиция Ньютона необычайна именно потому, что он опирался на великую сокровищницу знаний и мог воспринимать и помнить то, что обыкновенный человек не воспринимает или быстро забывает. Как великий актер чувствует аудиторию, перед которой выступает, отталкиваясь в своем творчестве от прекрасного знания эмоций и поведения людей, так и Ньютон чувствовал природу и мог опираться на богатые наблюдения явлений. Быть может, именно в тонком восприятии окружающего мира — мира людей или мира предметов — и заключается величие.

Задача 1. Первая проверка закона всемирного тяготения

Ньютон не указал, почему падают яблоки. Назвав причину возникновения веса тел словом «гравитация», происходящим от латинского и французского слов «тяжелый», он ничего не объяснил. Утверждение «Земля притягивает яблоко» связывает причину притяжения с Землей, а не с небом, но ничего не дает для понимания сущности гравитации. Между тем, столкнувшись с вопросом «Что удерживает Луну и планеты на их орбитах?», Ньютон смог предложить «объяснение» в том смысле, что одно и то же свойство природы обуславливает также движение планет по орбите и падение яблок. Поэтому «объяснение» означает только объединение этих явлений, объяснение их одной общей причиной. Но уже это весьма полезно для дальнейших выводов и для упрощения наших представлений о природе.

Изучая движение Луны, Ньютон вычислил ее ускорение v^2/R . Эта величина оказалась значительно меньше обычного значения g , равного $9,81$ м/сек². Поэтому Луна должна была бы падать под действием силы тяжести, если бы земное притяжение не было значительно ослаблено расстоянием. Ньютон пытался рассмотреть простую форму зависимости ослабления притяжения — закон убывания силы тяжести обратно пропорционально квадрату расстояния. Он предположил, что с увеличением расстояния вдвое сила тяжести уменьшится в 4 раза, а если расстояние возрастет в 10 раз, то сила уменьшится в 100 раз и т. д.

Используя приведенные ниже данные, повторите вычисления Ньютона, определив (расчеты нужно вести с большой точностью¹⁾):

- а) ускорение Луны в м/сек², если принять $a = v^2/R$;
- б) ожидаемое значение g на Луне в м/сек², считая, что «земное» значение g убывает по закону обратных квадратов. Нужно предположить, что Земля притягивает яблоко так, как если бы вся ее масса была бы сосредоточена в центре Земли, т. е. на расстоянии одного земного радиуса от яблока.

В связи с тем что ответ требуется дать в м/сек², величины расстояний нужно перевести в метры, а время в секунды, прежде чем подставлять данные в формулы. Впрочем, вы можете воспользоваться переходными коэффициентами и отложить перевод единиц, пока это не станет необходимым. Однако смещение километров, часов, метров, секунд может запутать вычисления. Данные. Радиус Земли 6367 км.

Радиус лунной орбиты в 60,3 раза больше земного;

1 месяц = 27,3 дня (это абсолютный период обращения Луны по отношению к неподвижным звездам);

1 км = 1000 м; g яблока = $9,81$ м/сек².

Задача 2. Третий закон Кеплера

Ньютон пришел к выводу о всеобщем характере закона, согласно которому сила притяжения между телами обратно пропорциональна квадрату расстоя-

¹⁾ Этот расчет был решающей проверкой великой теоретической идеи. Вы должны выполнить все арифметические действия очень точно, иначе это будет простой потерей времени. Ответы на два поставленных в задаче вопроса должны быть получены с тремя значащими цифрами (это потребует пяти десятичных порядков в значениях величин с размерностью м/сек²). Вначале получите ответы в буквенных выражениях, без каких-либо сокращений, а затем — численный результат.

ния. Мы выражаем этот закон в виде $F = GM_1M_2/d^2$. Из этого закона («принципа») он вывел (предсказал) свойства движения Луны, планетной системы, приливов и т. д.

Получите третий закон Кеплера, пользуясь приведенными ниже указаниями. Предположите, что Солнце, масса которого M , удерживает на круговой орбите планету массой m за счет гравитационного притяжения, причем радиус орбиты равен R . Предположите далее, что планета движется с заданной скоростью v , затрачивая время T (планетный «год») на то, чтобы совершить один оборот.

- а) Получите в алгебраической форме:
ускорение планеты;
силу, необходимую, чтобы придать планете ускорение;
силу гравитационного притяжения, если она подчиняется закону тяготения Ньютона;
скорость v планеты, выраженную через величины R и T .
- б) Докажите следующее:
напишите полученное Ньютоном алгебраическое уравнение, согласно которому искомая сила, необходимая, чтобы придать планете ускорение, равна гравитационному притяжению;
исключите из этого уравнения v , пользуясь соотношением, выраженным через величины R и T ;
перенесите величины R и T в левую часть уравнения, а все остальное в правую часть, получив таким путем новое уравнение;
найдите ли вы R^3/T^2 в левой части нового уравнения?
(Если нет, проверьте свои выкладки.) Установили ли вы, что правая часть одинакова для всех планет, что она постоянна и не содержит m , R , T ?
будет ли это новое уравнение справедливо с той же самой правой частью для других планет с разными массами, орбитами, периодами обращения, но с тем же Солнцем? Следует ли из соображений Ньютона третий закон Кеплера?

Задача 3. Второй закон Кеплера (Закон «равных площадей»)

- а) Что утверждает этот закон? (Приведите чертеж.)
- б) Ньютон показал, что этот закон должен выполняться для любого движения планет, если...(?)
- в) Просмотрите геометрическое доказательство, сделанное Ньютоном, затем запишите ваш вариант доказательства и дайте рисунок. (Сделайте лучше несколько четких рисунков вместо одного, слишком подробного.)

Задача 4. Относительные массы планет

- а) Используя законы движения Ньютона, $a = v^2/R$ и закон всемирного тяготения $F = GM_1M_2/d^2$, покажите, как можно получить на основе астрономических измерений отношение (масса Юпитера)/(масса Солнца). Оцените конечный результат, не ссылайтесь на алгебраический результат.
- б) Определите приблизительно¹⁾ это отношение (см. данные ниже).
- в) Сделайте аналогичные оценки отношения (масса Земли)/(масса Солнца).

¹⁾ В задачах требуется очень приблизительный результат, дающий лишь общее понятие об относительных массах или величинах некоторых сил; точ-

г) Из экспериментов, подобных опытам Кавендиша, можно оценить массу Земли. Ее величина около $6,6 \cdot 10^{21}$ т. Вычислите приблизительно из приведенного выше отношения массу Солнца в тоннах.

Данные (некоторые из них могут не потребоваться).

Радиусы орбит планет (см. табл. в гл. 18).

Продолжительность «года» планет (см. табл. в гл. 18).

Данные о спутниках Юпитера (см. гл. 19). (Не пользуйтесь величинами радиусов орбит в единицах радиуса Юпитера, а используйте величины в мплях. Времена даны в часах, преобразуйте их в единицы, которые вы использовали в других вычислениях.)

Данные о Земле:

Собственный радиус ~ 6300 км.

Время обращения вокруг оси 24 часа.

Радиус орбиты ~ 150 млн. км.

1 год ≈ 365 дней $\approx 3 \cdot 10^7$ сек.

Данные о Луне:

Радиус орбиты ~ 60 земных радиусов.

Собственный радиус ~ 1600 км.

1 месяц $= 27,3$ дня. (Это абсолютный период обращения Луны по отношению к звездам.)

Задача 5. Искусственные спутники

а) Предположим, что спутник Земли описывает круговую орбиту на высоте 6300 км над поверхностью Земли, так что он находится на расстоянии 12600 км от центра Земли. Используя свои знания о движении планет, оцените время, которое требуется спутнику на один оборот по орбите. Дайте ответ без сокращений, приведенный к округленному числу, выраженному в часах, или минутах, или днях, или годах.

ных арифметических вычислений не требуется, поэтому советуем учесть следующее:

А. Пользуйтесь алгебраическими выкладками до тех пор, пока это возможно.

Б. После этого подставьте арифметические величины, не сокращая их, и представьте результат со всеми коэффициентами. (Не сокращайте этот первый результат, а оставьте его нетронутым на тот случай, если вам понадобится к нему вернуться или потребуется его проверить.)

В. Перенесите «результат» пункта Б и сделайте грубую аппроксимацию, чтобы получить весьма приближенный ответ. Ниже даны три схемы аппроксимации:

а) Используйте грубые арифметические подсчеты. Это даст удовлетворительные результаты быстрее, нежели что-либо другое, если не считать специальных приемов и опыта. (Сведите все данные к степеням 2 или 10, а затем сокращайте. Помните: $2^{10} \approx 10^3$.)

б) Пользуйтесь таблицами логарифмов. Достаточны логарифмы с двумя десятичными знаками.

в) Используйте логарифмическую линейку. Делайте грубые прикидки для определения первого десятичного знака.

Если ваш результат больше или меньше верного в 1000 раз, то он бесполезен, если же только на 40% за счет неточности в выкладках, то он дает полезные данные.

(Используйте любые данные, полученные в предыдущих задачах. Величина G вам не потребуется.)

- б) Инженеры телевидения предлагают запустить спутник, который мог бы ретранслировать коротковолновые передачи, обеспечивая Западное побережье программами из Нью-Йорка. Им хотелось бы, чтобы спутник стоял на месте, находясь, например, все время над Чикаго, не используя двигателей для поддержания заданного положения.

Опишите движение такого спутника, наблюдаемого с далекого расстояния от Земли.

Рассчитайте высоту, на которой такой спутник мог бы находиться. (Дайте ответ в буквенном выражении, а затем в километрах.)

- в) Спутник совершает оборот вокруг Земли за 90 минут (относительно звезд). Предполагая, что его орбита круговая, оцените, на какой высоте над Землей находится такой спутник.

- г) Предположим, что снаряд выпущен из пушки горизонтально с такой скоростью, что он никогда не упадет на Землю, а будет вращаться над самой Землей.

Какое время потребуется, чтобы снаряд возвратился в исходную точку (сопротивлением воздуха пренебрегаем)?

Оцените скорость снаряда.

Скорость, которую требуется определить выше, равна скорости точки на экваторе, если бы Земля стала вращаться со скоростью... (?)

- д) (Требуется быстрый ответ — время 15 сек; по нему можно судить о том, насколько вы усвоили прочитанное.) Какое время потребовалось бы спутнику Земли, чтобы обойти ее по круговой орбите радиусом 400 000 км?

Задача 6. Атомная модель Бора

Бор создал простейшую модель атома водорода с электроном, движущимся по круговой орбите вокруг тяжелого ядра, в которой справедлив закон обратных квадратов для электрических сил. (Эта картина атома ныне считается неверной, но она еще применяется для объяснений, и даже физики, когда им нужна грубая картина, используют эту модель для прикидок.) Квантовая теория, сформулированная Бором, устанавливала, что могут существовать только те круговые орбиты, для которых

$$(\text{Импульс электрона}) \cdot (\text{Размер орбиты}) = n \cdot h,$$

где h — универсальная постоянная Планка, а n — целое число (1, 2, 3 и т. д.).

- а) С помощью законов Кеплера и Ньютона покажите, что радиусы разрешенных орбит должны быть пропорциональны n^2 , т. е. 1 : 4 : 9... (Так что если возбужденный атом имеет радиус x , то атом в возбужденном состоянии будет иметь радиусы $4x$, $9x$ и т. д.)

- б) Радиус атома водорода ($n \approx 1$) примерно равен $0,5 \text{ \AA}$ ($0,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}$). Возбужденные атомы водорода наблюдаются в звездах с n , равным 30. Каков «размер» такого атома?

«...Вы, без сомнения, должны быть удовлетворены...»

(Фраза из обращения судьи к присяжным заседателям на уголовных процессах.)

Идеи закона всемирного тяготения уже «витали в воздухе», когда Ньютон производил свои расчеты. Ряд ученых размышлял о том, что лежит в основе законов Кеплера. Делались попытки ответить на вопрос, можно ли объяснить движение планет притяжением Солнца, которое ослабевает по мере удаления от него. Ньютон извлек доказательство из моря домыслов и расширил предположение о силе притяжения Солнцем до понятия о всемирном тяготении. Он проверил свое предположение об обратной пропорциональности силы квадрату расстояния, рассмотрев движение Луны, и на основе этого пришел к законам Кеплера. Последующие проверки этой идеи на движении спутников Юпитера показали, что между планетами и их спутниками действуют силы того же типа, что и между Солнцем и планетами. Таким образом, на основе экспериментальных доказательств множитель $1/d^2$ в соотношении $F = GM_1M_2/d^2$ был вполне обоснован для случая Солнечной системы.

Символический эксперимент Галилея (фиг. 182) определяет множитель M_2 , т. е. массу притягиваемого тела. Так как ускорение свободного падения g одинаково для всех тел, Земля должна притягивать их с силой, пропорциональной их массам M_2 , M'_2 .

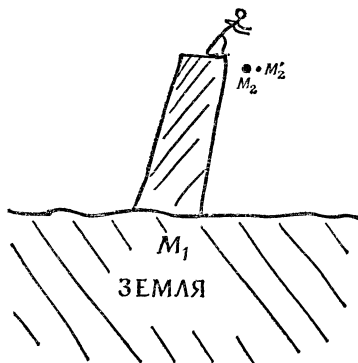
Ньютон полагался на свой третий закон (действие равно противодействию), который он считал частично подтвержденным в опытах с маятником по проверке сохранения количества движения. Гравитационное воздействие M_1 на M_2 должно быть равно и противоположно гравитационному воздействию M_2 на M_1 , т. е. ${}_1F_2 = {}_2F_1$. Поэтому G должно быть одинаковым для обеих сил:

$${}_1F_2 = \frac{G(M_1M_2)}{d^2}, \quad {}_2F_1 = \frac{G(M_2M_1)}{d^2}.$$

Таким образом, притягиваемое и притягивающее тела взаимозаменяемы и гравитационное притяжение должно быть пропорцио-

нально массе притягиваемого тела. Это кажется очень правдоподобным, даже несомненным для всех, кто верит в симметрию; однако проверить это экспериментально на основе астрономических измерений нельзя, поскольку мы сможем определить массы *астрономических* тел только тогда, когда космонавты доставят нам образцы и представят результаты своих наблюдений. На основе своей теории Ньютону удалось оценить отношения масс небесных тел: $(\text{масса Юпитера})/(\text{масса Солнца})$, $(\text{масса Земли})/(\text{масса Солнца})$

Фиг. 182. Символический эксперимент Галилея.



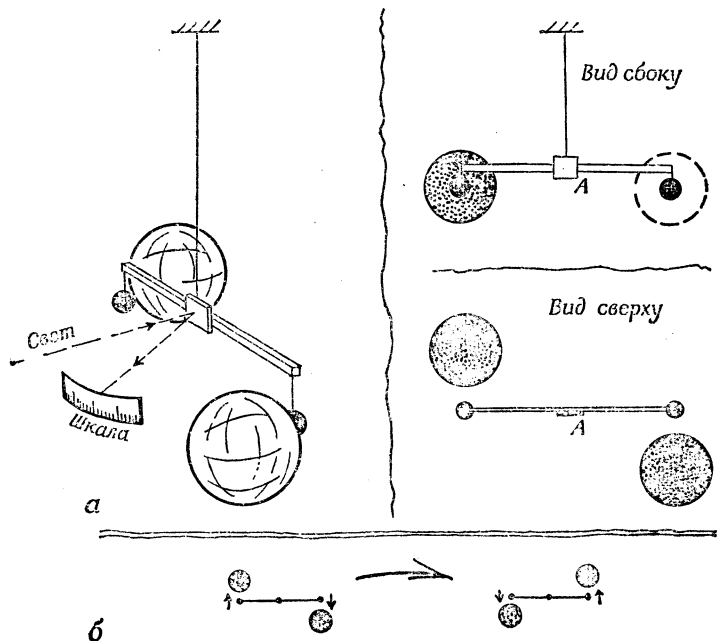
и даже, основываясь на догадках о роли приливов, отношение $(\text{масса Луны})/(\text{масса Солнца})$, но он не мог вычислить массу каждого из этих тел в отдельности, так как не знал величины гравитационной постоянной G . Для определения величины G надо было выполнить в лаборатории эксперименты по измерению очень слабого притяжения между двумя телами с известными массами.

Измерение величины G

Величина гравитационной постоянной G оставалась неизвестной еще спустя полвека после Ньютона. Оценки величины G на основе предположений, подобных гипотезе Ньютона о средней плотности Земли, показали, что гравитационное притяжение тел в лабораторной обстановке должно быть безнадежно малым. Обычно сила тяжести кажется большой, так как обусловлена громадной массой Земли. А Солнце, обладая чрезвычайно большой массой, управляет всей планетной системой. Гравитационное притяжение тел привычных нам размеров настолько мало, что мы не замечаем его по сравнению с притяжением Земли и силами с малым радиусом

действия, возникающими между телами, когда те находятся в «контакте». Поэтому стало ясно, что измерение G потребует тонких и сложных экспериментов.

В конце XVIII столетия несколько ученых предприняли отчаянную попытку провести такой эксперимент, используя в качестве притягивающего тела гору известных размеров. Они оценили значение G , измеряя притяжение горой расположенного



Фиг. 183. Установка Кавендиша.

а — планка, несущая маленькие свинцовые шарики; закручивание нити становится заметным благодаря лучу света, отражающемуся от маленького зеркала А; б — для удобства угла поворота большие шары помещались так, чтобы планка разворачивалась в противоположных направлениях.

вблизи нее маятника. Чисто астрономическим путем было измерено крошечное отклонение маятника от вертикали, обусловленное притяжением горы. С помощью геологии они оценили массу горы и ее «среднее расстояние» от маятника. Подставляя результаты этих измерений в формулу $F = GM_1M_2/d^2$, они получили величину G .

Примерно в то же время Кавендиш, а позже и многие другие измерили методом прямого «взвешивания» гравитационное притя-

жение между массивными кусками металла и маленьким металлическим шариком. Кавендиш прикрепил пару маленьких металлических шариков к легкой планке, подвешенной в виде трапеции на длинной тонкой нити. К маленьким шарикам он подносил большие свинцовые шары. В результате воздействия этих шаров на маленькие планка поворачивалась и закручивала нить до тех пор, пока эффект притяжения не компенсировался силами Гука в закрученной нити. Кавендиш измерил массы и расстояние от маленьких шариков до больших; для вычисления величины G ему надо было знать силу притяжения, т. е. упругую силу закручивания нити. Для прямых измерений нить была слишком тонкой и непрочной. Поэтому Кавендиш измерял период простых гармонических колебаний планки (см. гл. 10¹⁾). Измерив также массу и размеры планки, он смог вычислить силу закручивания нити. Так он получил хорошую оценку величины G , которую подтвердили в аналогичных более тщательных экспериментах Бойс, Гейл и др. Во всех случаях использовалась столь чувствительная аппаратура, что даже слабые воздушные потоки могли исказить измерения. Чтобы избежать конвекции, Кавендиш разместил свою аппаратуру в ящике, затем поставил ящик в закрытой комнате и проводил наблюдения за аппаратурой с помощью телескопа из другого помещения.

Результаты измерения G

В приведенной на стр. 300 таблице собраны некоторые данные, полученные в многочисленных экспериментах по измерению величины G , выполненных за минувшие 220 лет. Она не только демонстрирует все возрастающую достоверность измеренных значений этой важной величины, но и служит хорошей основой для проверки соотношений

$$\left. \begin{aligned} F &\sim M_1 \\ F &\sim M_2 \\ F &\sim \frac{1}{d^2} \end{aligned} \right\}, \text{ объединяемых формулой } F = \frac{GM_1M_2}{d^2}.$$

Из данных таблицы следует, что, несмотря на большое разнообразие использованных значений масс, материалов и расстояний, все эксперименты дают в пределах ошибок одно и то же значение измеряемой величины. Если мы хотим продемонстрировать точность, с

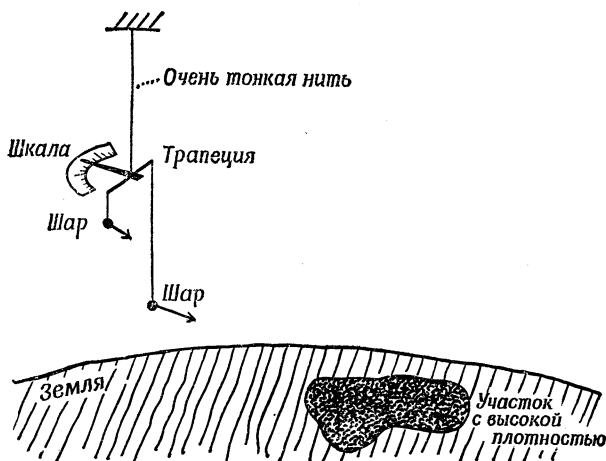
¹⁾ Гл. 10 («Колебания и волны») входит в т. 1 настоящего издания.

Год (при- мерно)	Наблюдатель	Притягивающая масса		Притягиваемая масса		Расстоя- ние, м	Значение G , ньютонов·м ² /кг ²
		объект	масса, кг	масса, кг	объект		
1740	Буже	Гора	Много мил-	Масса маятника от несколь- ких десятых кг до несколь- ких кг	Маятник	Несколь- ко тысяч	12·10 ⁻¹¹
1774	Маскелин	»	лионов		»		от 7 до 8·10 ⁻¹¹
1821	Карлини	»	миллионов		»		8·10 ⁻¹¹
1854	Эйри	Внешняя обо- лочка Земли	3·10 ²⁰		»	6 000 000	5,7·10 ⁻¹¹
1854	Джеймс	Гора	Много мил-		»	Несколь- ко тысяч	7·10 ⁻¹¹
1880	Менденхол	»	лионов		»		6,4·10 ⁻¹¹
1887	Престон	»	миллионов		»		6,6·10 ⁻¹¹
1798	Кавендиш	Свинцовый шар	167	0,8	Свинцовый шар	0,2	6,75·10 ⁻¹¹
1842	Бейли	»	175	от 0,1 до 1,5	{ Шары из свин- ца, цинка, пла- тины, стекла, латуни	0,3	от 6,5·10 ⁻¹¹ до 6,6·10 ⁻¹¹
1881	фон Джолли	»	45 000	5		0,5	6,46·10 ⁻¹¹
1891	Пойнтинг	»	160	23		0,3	6,70·10 ⁻¹¹
1895	Бойс	»	7	0,0012	Золотой шар	0,08	6,658·10 ⁻¹¹
1896	Браун	{ Латунный шар	5	0,05	Латунный шар	0,08	6,66·10 ⁻¹¹
		Железный шар	9				
1898	Ричарз и Кри- гар-Мензель	Свинцовый куб	100 000	1	Медный шар	1,1	6,68·10 ⁻¹¹
1930 } 1942 }	Гейл и Кржа- новский	Стальной ци- линдр	66	0,05	{ Платина, стек- ло, золото	0,1	6,673·10 ⁻¹¹

которой мы знаем величину G , для этого достаточно воспользоваться одним очень точным экспериментом. Но мы хотим дать убедительные доказательства применимости теории Ньютона и поэтому приводим результаты разнообразных экспериментов.

Современное использование эксперимента Кавендиша

Первые грубые измерения значения G дали хорошее представление о величине гравитационных сил. Притяжение между двумя людьми, сидящими рядом, неизмеримо мало; притяжение между Солнцем и Землей невероятно



Фиг. 184. Дифференциальный измеритель силы тяжести.

велико — его может заменить разве что стальной канат с диаметром, равным поперечнику Земли. Электрическое притяжение между электроном и ядром в атоме водорода сильнее их гравитационного притяжения примерно в

2 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 раз ($2 \cdot 10^{39}$ раз).

Более поздние измерения дали очень точное значение G с ошибками меньше 0,2%. Не далее как в 1942 г. Гейл из Национального бюро стандартов в Вашингтоне сделал одно из самых надежных измерений этой фундаментальной постоянной. До тех пор пока какая-либо новая теория не потребует более точных измерений, эксперимент Кавендиша едва ли будет повторен. Однако прибор такого типа нашел применение в конструкции дифференциального измерителя силы тяжести (фиг. 184), с помощью которого можно измерить весьма небольшие изменения силы тяжести вблизи горной породы, отличающейся по плотности от соседних пород. Этот прибор используется геологами для исследований земной коры и разведки геологических особенностей, указывающих на месторождение нефти. В одном из вариантов прибора Кавендиша два

парика подвешиваются на *разной высоте*. Тогда они будут по-разному притягиваться близким к поверхности месторождением плотной горной породы; поэтому планка при надлежащей ориентации относительно месторождения будет слегка поворачиваться. Такой прибор представляет собой модификацию «магического жезла», указывающего, где залегают металлы. То, что достаточно громоздкую конструкцию удалось сделать портативной и чувствительной, следует считать триумфом техники. Разведчики нефти заменяют теперь эти дифференциальные измерители силы тяжести инструментами, непосредственно измеряющими небольшие изменения величины ускорения силы тяжести g .

Чтобы проверить, влияет ли изменение температуры, наличие промежуточного экрана, кристаллическая структура и т. д. на гравитационное притяжение, были выполнены различные варианты эксперимента Кавендиша. Пока никаких изменений в величине G не обнаружено. По-видимому, эта величина есть универсальная постоянная даже тогда, когда M_1 и M_2 содержат массу, соответствующую ядерной энергии, которая *может выделиться* при распаде радиоактивного вещества: соотношение $F = GM_1M_2/d^2$ по-прежнему выполняется и значение G остается одним и тем же,

Рассуждения

В настоящее время большинство физиков рассматривает гравитационную постоянную в качестве такой же истинной постоянной, как скорость света, заряд электрона и некоторые другие универсальные мировые константы, которые, по-видимому, одинаковы для всех веществ и при любых условиях. Однако некоторые довольно смелые, но не слишком благоразумные люди предполагают, что G может медленно меняться с течением времени (см. ниже). Если предположить, что раньше G было много больше, то можно прийти к выводу, что в отдаленном прошлом гравитационные и электрические силы имели сравнимую величину.

Физики-теоретики пытаются связать поле силы тяжести с электрическим и магнитным полями в единой «общей теории поля»

Некоторые ученые надеются показать, что между G и другими основными физическими постоянными существует связь — возможно, через магнетизм или через полное количество элементарных частиц во Вселенной.

Самое существенное — это время

Некоторые физики и астрономы, рассуждая о свойствах пространства, времени и материи, высказывали предположение, что если постоянную G измерять прибором с использованием *атомных часов*, то она будет медленно меняться. (Пользуясь маятниковыми часами для измерения периода колебаний планки или помещая маятник вблизи горы, мы не должны обнаружить каких-либо изменений, так как при этом сравнивается G с земным ускорением силы тяжести g , которое содержит G в качестве множителя.) Возникает вопрос о *времени*. Как мы его себе представляем? И откуда мы знаем, что одна секунда теперь имеет такую же длительность, как и раньше? Существует несколько типов «часов». В одних в качестве единицы времени используют качание маятника, в других — простое гармоническое движение нагруженной пружины (см. гл. 10¹⁾); используют также вращение Земли (звездный день) или полный

¹⁾ Гл. 10 («Колебания и волны») входит в т. 1 настоящего издания.

оборот Земли вокруг Солнца (солнечный год), движение атомов (спектральные линии, спины атомов...) или распад радиоактивных веществ (см. гл. 39¹⁾). Показания ряда типов часов зависят главным образом от свойств *атомов* (т. е. от радиоактивного распада) и даже от вращения Земли, которое остается практически неизменным, даже если изменяется сила тяжести. Некоторые из часов прямо используют силу тяжести (маятники, солнечный год). Таким образом, нам придется иметь дело с двумя разными шкалами времени.

Геологи и астрономы высказывают интересные догадки о возрасте Вселенной, основанные на измерениях радиоактивности, температуры звезд, скорости туманностей и расстояний до них. По оценкам возраст Вселенной достигает 10 миллиардов лет по *атомной* шкале времени. Существует также гравитационная шкала времени (т. е. маятниковые часы или солнечный год), в соответствии с которой дата рождения Вселенной намного сдвигается назад, возможно даже в «минус бесконечность»²⁾. В этом случае вопрос о «возникновении Вселенной» представился бы в совершенно другом свете

¹⁾ Гл. 39 («Радиоактивность») входит в т. 3 настоящего издания.

²⁾ Вообразим себе такую схему. Предположим, что величина *C* медленно уменьшается в соответствии с показаниями «атомных» часов. Маятниковые часы, показывающие гравитационное время в прошедшие времена, **должны** были идти быстрее (такое заключение делается на основе вращения Земли или по атомным часам). Тогда Земля в прошедшие времена должна была бы вращаться медленнее (судя по маятниковым часам). Примем гравитационное время, показываемое маятниковыми часами, за относительный стандарт и будем наблюдать за изменениями времени в атомной шкале. (Ни одну из этих шкал времени нельзя считать истинной по сравнению с другой — только предубеждение заставляет нас считать, что атомное время более правильно и течет с постоянной скоростью.)

Представим себе, например, что соотношение между этими двумя шкалами времени «экспоненциальное», так что атомные часы по сравнению с маятниковыми удваивают свою скорость за триллион «маятниковых дней». Мы выбираем это одно из бесчисленного количества возможных соотношений просто для иллюстрации. Чтобы эта иллюстрация была еще проще, вообразим, что скользящая шкала, связывающая эти две системы часов, изменяется не плавно, а скачками, так что после каждого триллиона дней по маятниковым часам атомные часы внезапно удваивают свою скорость — вдвое чаще тикают за маяниковый день, чем прежде. (Такая схема скачков безнадежно маловероятна. Математические расчеты легче проводить как раз для случая гладкой экспоненциальной зависимости, которая может быть ближе к истине.) Тогда мы найдем, что для каждого триллиона дней, которые мы отсчитываем в прошлое по маятниковым часам, атомные часы работали бы вдвое медленнее, т. е. за каждый маяниковый день было бы вдвое меньше тиканий атомных часов. Если вести счет времени назад, начиная с настоящего времени, то первый триллион дней будет одним и тем же в обеих шкалах времени; для следующего триллиона маятниковых дней атомные часы будут работать вдвое медленнее и покажут только $\frac{1}{2}$ триллиона дней и т. д. Если мы путешествуем в прошлое такими периодами в триллион дней по маятниковым часам, то соответственно пройдем:

ПО МАЯТНИКОВЫМ ЧАСАМ: 1 триллион дней + 1 триллион + 1 триллион + ...

ПО АТОМНЫМ ЧАСАМ: 1 триллион дней + $\frac{1}{2}$ триллиона + $\frac{1}{4}$ триллиона + ...

Многие из этих рассуждений — фантастические измышления на границе метафизики, между философией и наукой. Но даже реальные эксперименты по измерению величин g и G , проводимые теперь, могут в течение следующих 10 лет привести к неожиданному пересмотру наших взглядов на гравитацию, что отразится на широком круге вопросов: от стандартов хронометрирования до теоретической космологии.

Задача 1

Ньютон догадался об универсальном характере закона тяготения. Мы выражаем его догадку посредством соотношения $F = GM_1M_2/d^2$. На основе своего предположения Ньютон предсказал поведение Луны, планетных систем, приливов и т. д.

- 1) Скажите, что обозначает каждая буква в приведенном выше соотношении, и поставьте присущие им размерности в системе единиц измерения метр, килограмм, секунда (МКС). Спишите этот пример и проделайте то же самое для остальных обозначений. (Пример: « G — универсальная постоянная, одинаковая для всех тел. Она измеряется в единицах ньютон·метр²/кг²».)
- 2) Величина G — это универсальная постоянная, измеренная Кавендишем и другими. Если мы будем измерять силу в ньютонах, массы в килограммах и расстояние в метрах, то получим для величины G значение, равное $6,66 \cdot 10^{-11}$ (или 0,0000000000666) ньютон·метр²/кг². Исходя из этой величины, можно определить массу Земли:
 - а) Используя приведенные выше формулу и величину G , рассчитайте силу притяжения Землей яблока массой 0,40 кг вблизи поверхности Земли. (Предположим, что притяжение останется таким же, если считать, что центр тяжести расположен в центре Земли на расстоянии 4000 миль от яблока.) Радиус Земли равен примерно 4000 миль, или около 6 400 000 м. Обозначьте массу Земли в килограммах через M^1).
 - б) Рассчитайте вес (т. е. притяжение со стороны Земли) яблока массой 0,40 кг в ньютонах.
 - в) Предполагая, что ответы на первые два вопроса одинаковы, напишите уравнение и решите его относительно массы Земли. Она будет выражена в килограммах. Переведите ее в фунты, затем в тонны. Используйте «оценку» ($1 \text{ кг} \approx 2,2 \text{ фунта}$)²).

Во втором ряду никогда не получится больше 2 триллионов, хотя первый ряд растет до бесконечности. Таким образом, отсчитывая время по атомным часам, мы приходим к конечному начальному времени (2 триллиона дней назад в нашем примере), а соответствующий интервал для маятниковых часов сдвигается до минуса бесконечности.

В этом примере, если измерять время с помощью радиоактивных превращений или по вращению Земли (которое определяет звездный день), мы должны будем прийти к выводу, что Вселенная возникла примерно 2 триллиона лет назад, но мы никогда не смогли бы вернуться назад к началу Вселенной, отсчитывая маятниковые дни или солнечные годы.

¹ Поскольку в этом задании вы не знаете массы Земли, то в своем ответе можете обозначить ее буквой M .

² Объяснение термина «оценка» см. в гл. 11 («Интерлюдия. Приложение по арифметике», входит в т. 1 настоящего издания), а также см. примечание в конце гл. 22 (стр. 293 и 294).

Задача 2. Как велико гравитационное притяжение?

Для оценки силы притяжения Земли Солнцем проведите следующий грубый расчет. Предположим, что гравитационное притяжение Земли можно заменить стальной проволокой и что натяжение проволоки удерживает Землю на ее орбите. Для хорошей стали натяжение на разрыв равно 100 тоннам силы на квадратный дюйм.

а) Оцените площадь сечения проволоки, способной удержать Землю на орбите.

б) Оцените диаметр этой проволоки.

Данные: $G = 6,7 \cdot 10^{-11}$ ньютон $\cdot$ м²/кг²;

расстояние от Солнца до Земли 93 млн. миль;

масса Солнца около $2 \cdot 10^{27}$ тонн;

масса Земли $6,6 \cdot 10^{21}$ тонн.

Задача 3. Насколько мало гравитационное притяжение?

Приблизленно рассчитайте притяжение между двумя сидящими молодыми людьми, предполагая, что они имеют сферическую форму и что масса одного из них 70 кг, а другого 90 кг, а расстояние между их центрами 0,80 м.

Задача 4. Другие силы: кометы

Кометы — это, по-видимому, скопления твердых частиц пыли и газа.

а) Объясните, почему следовало бы ожидать, что комета, если ее движение определяется гравитацией, будет двигаться как целое, не изменяя своей формы (большие и малые частицы будут сохранять взаимное расположение), и не должна иметь хвоста, отстающего от нее или опережающего ее?

б) Действием каких сил можно объяснить наличие кометных хвостов? (Определите основные характеристики этих сил предпочтительно путем описания их математического выражения, а не из физической природы.)

в) Дайте обоснование вашему ответу на предыдущий вопрос.

«Настало время нам взглянуть на путь,
Который пройден был,
И вскинуть взор к вершине,
Которую стремимся мы достичь».

Дж. Бэдди

«Создание научной теории имеет сходство с маленькой историей о «плюглях».

Рассказывают, что некогда в одной стране народ волновался две очень сложные загадки. Мудрейшие люди страны в течение многих лет ломали над ними головы. А было так: если кто-нибудь из жителей этой страны хотел, скажем, найти карандаш, он никогда не мог его отыскать. А если кто-нибудь, имевший карандаш, хотел его очинить, то обнаруживал, что точилка уже наполнена карандашными стружками.

Такое неприятное положение дел вызвало народные волнения, и правительство вынуждено было назначить авторитетную комиссию, состоящую из выдающихся философов, для проведения подробного расследования. Этой комиссии было предложено выяснить, чем объясняются столь грубые нарушения порядка... Расследование проходило в очень трудных условиях, ибо нетерпеливый народ все громче и настойчивее требовал ответа на волновавшие его вопросы. Наконец, по прошествии времени, показавшегося всем очень долгим, комиссия появилась перед главой государства и представила поистине блестящее объяснение этих таинственных явлений.

Объяснение было очень простое. Согласно высказанной учеными теории, под землей живет много маленьких людей, называемых плюглями. Ночью, когда все люди спят, они входят в дома. Они шныряют по дому, собирают все карандаши и торопливо оттачивают их с помощью точилок, затем опять скрываются под землей.

Народные волнения стихли. Очевидно, это была блестящая теория. Единым росчерком она объяснила обе тайны.

*Венделл Джонсон*¹⁾

К началу XVIII века наука представляла собой целую систему, состоящую из огромного количества накопленных к тому времени экспериментальных фактов, объединенных логическими рассуж-

¹⁾ Из книги «People in Quandaries», New York, 1946.

дениями и выводами. Прежде чем перейти к рассмотрению дальнейшего развития физики, скажем несколько слов о том, каковы компоненты, составляющие науку.

Почему мы называем теорию Ньютона хорошей теорией, а теорию о плогях — плохой? Чем обусловлены качества теории и почему мы придаем ей в настоящее время столь большое значение? В этой главе мы обсудим именно эти вопросы.

Мы не приводим здесь сжатого определения научной теории или научного познания; попытка дать подобное определение была бы смешной — столь многообразна и сложна природа этих терминов, имеющих такое важное значение. Мы должны развить у себя вкус к этим понятиям как к изысканной стряпне; ведь в некотором смысле научная теория — своего рода интеллектуальная пища. Все, что можно здесь сделать, это предложить вам некие общие рассуждения о том, что следует понимать под хорошей теорией, и привести «словарь» необходимых терминов. В этой главе мы ограничим рассмотрение теорией, соответствующей эпохе Ньютона. В последующих главах, особенно в гл. 44¹⁾, вы найдете другие рассуждения по поводу теории и другие взгляды на ее сущность. Мы советуем вам прочитать настоящую главу бегло, не стараясь извлечь из нее окончательные ответы на поставленные вопросы. Вы должны составить собственную точку зрения о том, что есть наука.

Мы приводим СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ, которые могут понадобиться в дальнейшем.

Факты

Большинство ученых-физиков верит в то, что они имеют дело с реальным внешним миром, или по крайней мере действуют так, как если бы они в это верили. Даже если у них возникают сомнения философского порядка, они все же исходят из «чувственных восприятий» или из «отсчетов на шкале приборов» как из реальных *фактов*. Мы верим таким фактам, потому что они согласуются между собой, несмотря на то что их получают независимо друг от друга различные наблюдатели. В обычной жизни подобные факты могут быть смутными, например: «У дяди Джорджа плохой характер». В физике же факты обычно представляют собой определенные измерения, результаты эксперимента, например:

кристалл имеет 8 граней;

лист бумаги имеет ширину 8,5 дюйм;

плотность алюминия в 2,7 раза больше плотности воды;

ускорение свободно падающего камня равно $9,81 \text{ м/сек}^2$;

¹⁾ Гл. 44 («Современная физика») входит в т. 3 настоящего издания.

орбита Марса в 2 раза больше орбиты Венеры; гравитационная постоянная равна $6,6 \cdot 10^{-11}$ в системе единиц МКС; атом имеет размеры, равные нескольким ангстремам.

Для полной ясности каждый из этих фактов нуждается в некоторых комментариях: определение терминов, степень точности, пределы применимости; однако в беседах между учеными эти уточнения обычно опускаются, подобно тому как в семейном кругу могут прийти к выводу, что у дяди Джорджа действительно плохой характер, не заботясь о точном определении того, что такое характер. По мере накопления фактов мы уходим все дальше и дальше от непосредственных ощущений и наши «факты» начинают все больше и больше зависеть от выбора теории, в рамках которой они рассматриваются. Слова «диаметр атома водорода равен 10^{-10} м» ничего не говорят до тех пор, пока мы не уточним поведение атомов, о которых идет речь, и не укажем даже, что за теория описывает их поведение ¹⁾.

Тем не менее мы должны располагать большим количеством фактов, полученных более или менее непосредственно из эксперимента, чтобы их можно было считать надежными: они должны быть одинаковыми независимо от того, когда, в каких лабораториях и какими наблюдателями они получены. «Можете ли вы повторить ваши результаты?» — вот один из первых вопросов, который обычно задает заведующий лабораторией восторженному молодому ученому.

Законы

Мы пытаемся собрать факты в отдельные группы и определить общие свойства, характеризующие их (например: все металлы хорошо проводят электрический ток; натяжение пружины меняется при изменении растягивающего ее груза). Мы пазываем полученные соотношения или утверждения *правилом, законом*, иногда *принципом*. Таким образом, закон — это отражение явлений природы, а не приказ, который она получает. Некоторые ученые идут дальше и идеализируют законы (см. гл. 5 ²⁾). Они считают каждый закон простым и точным, но при этом как бы составляют некий невидимый путеводитель, состоящий из реальных сведений, показывающих, насколько близко и в каких пределах природа следует идеальным законам. Этот невидимый путеводитель, которым пользуется ученый-экспериментатор, отличает последнего от любителя, знакомого лишь с формальным определением законов. Это не справочник, в котором приведены плотности различных тел, и не таблица логарифмов, а очень ценная карманная книга, в которой сочетаются эксперимент и теория.

Когда мы пытаемся установить некий закон, мы обычно сосредоточиваем наше внимание на определенных особенностях рассматриваемых явлений. При проверке закона Гука мы не обращали внимания на то, что пружина могла быть перекручена, гири могли быть окрашены в различные цвета, а материал, из которого они сделаны, мог даже испаряться. Пружина могла бы

¹⁾ Определение размеров атомов из рассмотрения процесса их столкновений дает различные результаты, так как при сильных столкновениях атомы как бы сплющиваются и их размеры уменьшаются. Поэтому при определении размеров с помощью таких косвенных измерений мы должны прибегать к некоторым теоретическим допущениям.

²⁾ Гл. 5 («Связь между напряжением и деформацией») входит в т. 1 настоящего издания.

нагреваться в зависимости от изменения температуры в лаборатории; в этом случае оказалось бы, что ее натяжение меняется не так просто. Обнаружив влияние температуры на наши измерения, мы пытаемся поддерживать ее постоянной. (Эта предосторожность особенно важна при исследовании расширения газа. При грубых измерениях со стальными пружинами этим можно пренебречь, но при более тщательных экспериментах обязательно следует вводить поправку на температуру.)

В физике большинство законов устанавливает соотношение между измерениями двух величин:

(натяжение)/(деформация) = const;

давление $\sim 1/\text{объем}$;

сила $\sim M_1 M_2 / d^2$;

интенсивность излучения $\sim T^4$.

Почти все законы можно выразить с помощью слова «постоянный» (const) как их существенной характеристики:

полное количество движения остается постоянным при любом столкновении;

(давление) $\cdot$ (объем) = const;

$F \cdot d^2 / M_1 M_2 = \text{const}$.

Мы стараемся найти законы, потому что стремимся привести в систему закономерности в поведении природы.

Концепции

В обычном смысле слова концепция — идея или же общее понятие. В научных дискуссиях мы придаем ему различные значения ¹⁾.

А. Второстепенные концепции

- 1) *Математические концепции* — полезные понятия, например: понятие о прямой пропорциональности (*растяжение $\sim$ груз*); понятие о пределе (*давление в данной точке; скорость как предел $\Delta s / \Delta t$*).
- 2) *Концепции наименований* — понятия, полезные при классификации и обсуждении. Мы даем наименования группе материалов (*металлы*) или общему свойству (*упругость*).
- 3) *Концепции определений* — понятия, которые мы придумываем и определяем для употребления в лаборатории. Они могут быть даны на основании простых измерений (*давление — из измерений силы и площади; результирующая нескольких сил; ускорение $= \Delta v / \Delta t$*). Или же они могут описывать некоторое состояние (*постоянство температуры; равновесие нескольких сил*).

Б. Главные концепции

- 4) *Научные концепции* — полезные понятия, получаемые из эксперимента: векторы складываются геометрически; теплота — причина повышения температуры тел; количество движения — величина, полезная при рассмотрении процессов столкновений; молекула как основная частица.

¹⁾ Превосходное обсуждение этих вопросов содержится в сообщении Джемса Б. Конанта (James B. Conant, *The Growth of the Experimental Sciences*, Harvard, 1949). Более подробное обсуждение «тактики и стратегии науки» можно найти в книге того же автора (*On Understanding Science*).

- 5) *Схемы понятий* — научные идеи более общего характера, вокруг которых концентрируется научная мысль, например:
теплота как форма молекулярного движения;
теплота как форма энергии;
система Коперника;
законы движения Ньютона;
представление об атмосфере как об океане воздуха, окружающем Землю.
- 6) *Великие схемы понятий*:
система движений планет по представлению древних греков;
теория всемирного тяготения Ньютона;
сохранение энергии;
сохранение количества движения;
кинетическая теория газов.

Умозрительные идеи

Большинство научных концепций рождается из эксперимента или до некоторой степени связано с экспериментом. Другие области научного мышления — чисто умозрительные. Однако они могут оказаться полезными и остаются в силе до тех пор, пока мы помним об их статусе. Мы можем их назвать *умозрительными идеями*. Представление о хрустальных сферах было чисто умозрительным — предполагалось, что они невидимы, и их существование было недоказуемо. В самом деле, схема Птолемея не была разрушена, когда оказалось, что сквозь сферы проходит комета: были разрушены только сами сферы. Рассматривая какую-либо схему понятий, будьте осторожны и старайтесь отделить необходимые понятия от умозрительных идей, которыми сопровождается их рождение.

«Теория» и «гипотеза»

Многие ученые называли бы большую схему, объединяющую ряд понятий, *теорией*, а умозрительную идею — *гипотезой*. Эти два термина иногда путают, и, может быть, лучше бы было избегать их. Однако мы будем употреблять их, и вы также можете с успехом это делать, проводя между ними следующее различие.

Г и п о т е з ы — это отдельные предположения или догадки, к которым прибегают при построении теории или при постановке эксперимента, имеющего целью непосредственную проверку какой-либо теории в том случае, когда это представляется возможным.

Т е о р и и — это мысленные схемы с допущениями, которые подбираются так, чтобы получалось согласие с экспериментальными данными; они содержат умозрительные идеи и общий подход к решению различных проблем, и это позволяет отнести их к главным концепциям.

Построение системы научных знаний

Наши сведения о природе мы получаем сначала путем индукции, извлекая общие законы из экспериментальных данных (см. гл. 1 ¹⁾). Затем, считая наш закон верным, мы предполагаем, что природа будет вести себя согласно этому закону, т. е. предпола-

¹⁾ Гл. 1 («Земное тяготение») входит в т. 1 настоящего издания.

гаем, что природа единообразна. Если вы обратитесь к ранним этапам развития астрономии (и к начальной стадии вашей собственной работы в лаборатории), то увидите, что, хотя знания, полученные методом индукции, достаточно надежны (например, законы движения планет, закон Гука), все же этот метод не особенно плодотворен в отношении объяснений и предсказаний. *Дедуктивная теория* дает нам значительно больше. Прибегая к ней, мы начинаем с допущений и законов, получая их либо на основе догадки, либо в результате эксперимента, либо по аналогии или путем умозрительных рассуждений, а затем даем объяснение и делаем новые предсказания. Однако, чтобы избежать ошибок древних философов, мы, конечно, должны проверять наши предсказания и выводы. Мы должны также понимать, откуда берутся законы, на которых основана наша теория.

Занимаясь научными исследованиями, вы должны пользоваться предположениями, основанными на теории и прошедшими проверку. Слишком много предположений может увести от действительности к магии.

Теперь снова поговорим о «демонах».

«Демоны»

Можно было бы задать такой вопрос: «Откуда вы можете знать, что катящийся шар останавливается вследствие трения, а не по воле демонов?» Предположите, что вы отвечаете на этот вопрос, возражая своему собеседнику, Фаусту, который считает, что шар останавливают демоны. Ваш спор может протекать следующим образом:

ВЫ. Я не верю в демонов.

ФАУСТ. А я верю.

ВЫ. Во всяком случае, я не представляю себе, как демоны могут создать трение.

ФАУСТ. Они просто становятся перед предметами и мешают им двигаться дальше.

ВЫ. Я не могу обнаружить демонов даже на самом грубом столе.

ФАУСТ. Они слишком малы и к тому же прозрачны.

ВЫ. Но на грубых поверхностях трение больше.

ФАУСТ. Но больше и демонов.

ВЫ. Масло уменьшает трение.

ФАУСТ. Демоны тонут в масле.

ВЫ. Если я отполирую стол, трение будет меньше и шар прокатится дальше.

ФАУСТ. Вы смываете демонов, и их остается меньше.

ВЫ. Более тяжелый шар испытывает большее трение.

ФАУСТ. На него оказывает действие большее количество демонов, и он сильнее дробит их кости.

ВЫ. Если я положу на стол шероховатый кирпич, то я могу толкать его против сил трения все сильнее и сильнее, но кирпич остается неподвиж-

ным до некоторого предела, так как трение уравнивает силу, с которой я его толкаю.

ФАУСТ. Конечно, демоны не позволяют вам сдвинуть кирпич с места, но их силы не беспредельны и они уже не могут противостоять вашему толчку.

БЫ. Но когда я толкну кирпич достаточно сильно и кирпич начнет двигаться, то трение будет в дальнейшем тормозить его движение.

ФАУСТ. Ослабев, демоны понадают под кирпич, и их раздробленные кости мешают кирпичу скользить по поверхности стола ¹⁾.

БЫ. Я их не ощущаю.

ФАУСТ. Проведите пальцем по столу.

БЫ. Трение подчиняется определенным законам. Например, опыт показывает, что на кирпич, скользящий по столу, действует трение, причем сила трения не зависит от скорости.

ФАУСТ. Конечно, вы раздавите одно и то же количество демонов, как бы быстро вы это ни делали.

БЫ. Если я буду двигать кирпич по столу снова и снова, трение будет в каждом случае одно и то же. Между тем демоны были раздавлены при движении кирпича по столу в первый раз.

ФАУСТ. Да, но они невероятно быстро размножаются.

БЫ. Существуют и другие законы трения: например, торможение пропорционально давлению одной поверхности на другую.

ФАУСТ. Демоны живут в порах поверхности: чем больше давление, тем больше демонов выходит на поверхность, они противодействуют движению и гибнут. Демоны действуют в соответствии с силами, с которыми вы имеете дело в ваших экспериментах.

Позиция Фауста уже ясна. Какие бы свойства вы ни приписывали давлению, он сейчас же прибегает к помощи демонов. Сперва его демоны появляются произвольно, но когда вы начинаете говорить о законах трения, он сейчас же противопоставляет им законы поведения демонов. Все заходит в тупик — одни и те же свойства одним из спорящих называются демонами, другим — трением, и каждый из них возвращается в результате спора к исходной точке.

Пользуясь термином «трение», вы не устанавливали до сих пор его связи с другими свойствами материи; теперь, подобно современному ученому, вы начинаете размышлять о том, какова молекулярная или атомная природа трения, и проводите опыты для проверки ваших предположений. Атомы, входящие в состав твердых тел, должны притягиваться друг к другу на малых расстояниях с большими силами. Когда поверхности твердых тел скользят или катятся одна по другой, небольшие выступы одной поверхно-

¹⁾ Если бы Фауст имел в своем распоряжении соответствующее оборудование, он смог бы предложить вам микрофон, присоединенный к стеклянному столу, а также к усилителю и громкоговорителю. Если вы покатаете стальной шарик по столу, то действительно услышите шумы, напоминающие хруст.

сти будут попадать в область атомного притяжения выступов на другой поверхности и будут препятствовать движению тел. В этом случае можно считать, что трение обусловлено атомным сцеплением; последнее может даже привести к тому, что частицы с одной поверхности будут переходить на другую. Это явление было исследовано экспериментально. Если передвигать медный брусок по гладкой поверхности стального столика, то на микрофотографиях можно увидеть, что на стали как бы прилипли крошечные ниточки меди, вырванные с поверхности медного бруска. С помощью химических методов было показано, что при трении двух металлических поверхностей одна о другую происходит взаимное проникновение частиц одного металла в другой ¹⁾.

Итак, мы наконец определили, что такое *трение*, и связали это явление с другими физическими явлениями. Мы пришли к выводу, что трение — это атомное или молекулярное сцепление, обусловленное теми же силами, благодаря наличию которых проволоки трудно поддаются разрыву, а капли дождя имеют сферическую форму. Механизм трения можно продемонстрировать с помощью фотографических методов и методов химического анализа. Можно даже на основе теории упругости предсказать, каковы должны быть законы трения. Трением можно объяснить целый ряд других явлений.

Теперь с полным основанием можно возражать против существования демонов: они выбираются произвольно, они неразумны и слишком многочисленны. Чтобы объяснить какое-то событие, каждый раз нужен специальный демон с особым поведением, поэтому мы должны прибегать к большому числу самых разнообразных демонов. Мы должны приписывать им разное поведение, чтобы удовлетворительно объяснить интересующие нас факты. Естественно, что мы теперь предпочитаем нечто более экономичное и удобное, а именно последовательную систему знаний, прочно основанную на экспериментах, проверенных и взаимосвязанных, в достоверности которых мы убеждены, и выражающуюся по возможности в нескольких общих законах. Даже тогда, когда мы сталкиваемся с новыми явлениями, которые не способны объяснить, мы не должны изобретать демонов, дабы разрешить мучающие нас сомнения.

¹⁾ Мы можем даже показать, что если *медный* брусок потереть о другой *медный* брусок, крошечные частицы, невидимые простым глазом, переходят с одного бруска на другой. Никакими химическими методами это взаимопenetрирование продемонстрировать, конечно, не удастся. Однако его можно показать с помощью других методов, о чем вы узнаете в конце нашей книги.

Теперь мы можем вернуться к различиям между теорией о плог-лях и теорией всемирного тяготения. Плогли — это те же демоны с особой спецификой. Автор сказки, психолог, рассматривает ее как пример ненаучной теории, пытающейся объяснить явления природы деятельностью неких богов или демонов. Он формулирует свое общее возражение против этой теории следующим образом: «В этой теории неверно лишь одно — никаких плоглей не существует». Но многие современные физики с этим не согласятся. Они не станут возражать против того, что плогли — всего лишь плод воображения (подобно любой «модели» в науке), но назвали бы теорию о плог-лях плохой теорией, ибо она слишком дорого обходится. Плогли были придуманы, и им были присвоены две линии поведения для объяснения двоякого рода событий; никаких других событий теория о плог-лях объяснить не может. Эта теория — «теория *ad hoc*», созданная лишь «для данной цели». В теориях *ad hoc* нет ничего порочного — они даже могут оказаться верными, но они слабы и обычно представляют собой не что иное, как гипотезы частного характера, принимаемые на веру. Если их рассматривать только лишь как «теории *ad hoc*», то они могут оказаться полезными при рассмотрении, честно учитывающем все затруднения и неясности. Если они помогают объяснить и *другие* наблюдения, то мы относимся к ним уже с большим уважением и присваиваем им более почтенное наименование.

Затем, по мере того как теория развивается и превращается из чисто умозрительной догадки в некую общую форму знания, которая может удовлетворительно объяснить многие наблюдаемые явления, мы начинаем все больше и больше ей доверять. И мы настолько удовлетворены ее последовательностью и плодотворностью, что говорим: «Она не может быть неверной». Рассмотрим теорию всемирного тяготения Ньютона как пример такой великой схемы понятий. Ньютон начал с некоторых допущений: с рассмотрения сил и перемещений как векторов, со своих законов движения, с пропорциональности сил тяготения массам притягивающихся тел, с закона обратных квадратов, с евклидовой геометрии. Некоторые из этих допущений были выведены из эксперимента; другие мало чем отличались от определений (первый закон, определяющий «нулевую силу») и рабочих правил (третий закон). Но каково бы ни было происхождение этих допущений, они являлись исходными точками дедуктивной теории. Затем шаг за шагом, путем рассуждений Ньютон извлек из этих допущений свое «объяс-

нение» Солнечной системы. Мы называем эту теорию хорошей, потому что она последовательна. Начав с общих допущений, Ньютон связал в единую систему явления, которые, казалось, не имели никакой связи:

Движение Луны по круговой орбите
Возмущения простого движения Луны
Движение планет
(1, II, III законы Кеплера)
Возмущения движения планет
Движение комет
Приливы и отливы
Форма Земли
Различия в силе тяжести
Прецессия равноденствий

ВСЕ ЭТО СВЯЗАНО
законом обратных
квадратов для силы
тяжести и враще-
нием Земли

Дедуктивная теория и научное познание

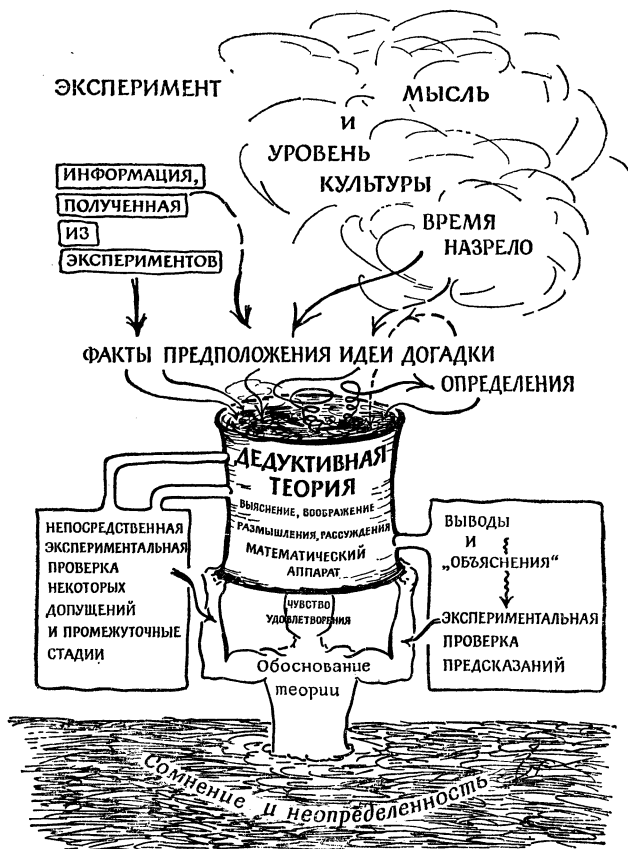
Фиг. 185 иллюстрирует построение «хорошей» теории. Сначала должно происходить индуктивное накопление знаний. Затем наступает время, когда теорию можно «сварить» из сложной смеси составных частей. Некоторые предположения следует подвергнуть предварительной проверке на ранних стадиях (подобно тому как Ньютон проверял на примере Луны закон обратных квадратов для силы тяжести). На более поздней стадии предсказания, предлагаемые теорией, должны быть подвергнуты экспериментальной проверке, что одновременно служит проверкой первоначальных допущений. Мы судим о теории не по тому, насколько она «правильна», а по тому, насколько она полезна, какие эксперименты она подсказывает и на какие мысли она наводит. Многие ученые, однако, видят значение великой теории не только в плодотворности ее предсказания, но в том глубоком чувстве уверенности, которое она дает. Приведенная схема показывает возникновение скорее научного знания, чем теории. Очевидно, это сложный метод, принимающий различные формы.

Научный метод

Теперь вам понятно, почему мы говорим, что существует не один, а много научных методов. Фрэнсис Бэкон (~1600) предлагал следующий формальный метод исследования:

производить наблюдения и регистрировать факты;

проводить большое количество экспериментов и сводить результаты в таблицы;
извлекать правила и законы методом индукции.



Фиг. 185.

Эти положения были затем развиты в тот научный метод, которого и сейчас придерживаются многие ученые ¹⁾:

¹⁾ Тот же метод «научного подхода» применяется некоторыми учеными в других областях, например в области общественных наук. Он оказывается полезным, если ему не следуют со слепым энтузиазмом — в последнем случае он может препятствовать прогрессу. Кроме того, мы не можем быть уверены в том, что метод, применимый в физике, окажется столь же плодотворным и в других областях науки.

производить наблюдения и извлекать из них правила или законы;
формулировать гипотезу (догадку, которая может быть чисто умозрительной);
выводить следствия из гипотезы и уже известных законов;
производить эксперименты для проверки этих следствий.

ЕСЛИ ЭКСПЕРИМЕНТ ПОДТВЕРЖДАЕТ гипотезу, следует ее принять как истинный закон и затем предлагать и проверять другие гипотезы.

ЕСЛИ ЭКСПЕРИМЕНТ ОТРИЦАЕТ гипотезу, следует искать другую гипотезу.

В действительности научное исследование не столь «логично» с научной точки зрения и не так просто. (Мы следуем такой схеме бессознательно, когда стараемся устранить неисправность в фарах машины или установить причину, почему в нашей квартире протекает потолок, но мы вправе считать, что действуем при этом согласно простому здравому смыслу.)

Научные методы

В ходе развития науки мы решаем проблемы и накапливаем знания с помощью самых различных методов. Иногда мы начинаем с догадок; иногда строим модель для математических исследований и затем проверяем результаты, полученные с помощью этой модели, проводя соответствующие эксперименты; иногда просто собираем экспериментальные данные, готовясь при этом к встрече с любыми неожиданностями; иногда планируем и выполняем один большой эксперимент и получаем важный результат непосредственно или путем статистической обработки полученных данных. Иногда, проводя серию экспериментов, мы переходим от одной стадии познания к другой — результаты каждого эксперимента оказывают воздействие на ход наших рассуждений и помогают планировать следующий эксперимент. Иногда мы производим длительный и сложный мысленный анализ, пользуясь как имеющейся информацией, так и законами, гипотезами, логическими умозаключениями и прибегая к экспериментальной проверке не систематически, а от случая к случаю. Однако эксперимент всегда играет роль главного пробного камня независимо от того, производится ли он вначале, когда факты только начинают накапливаться, или же в конце, при окончательной проверке какой-нибудь большой научной теории в целом.

Развитие теоретической мысли в тот или иной период времени зависит от того, насколько к этому времени назрела необходимость в данной теории и насколько подготовлена почва для восприятия новых идей как с интеллектуальной, так и с социальной точки зрения. Это справедливо и в настоящее время. Когда наступает надлежащий момент, одна и та же проблема часто привлекает внимание многих ученых одновременно и решение одной и той же задачи может быть получено не одним человеком, а несколькими, независимо друг от друга. Успех может выпасть на долю одного человека, наиболее способного и энергичного, которому удастся отстоять свое открытие.

Во времена Ньютона многое подготовило почву для новых великих открытий — усилившийся интерес к законам движения вообще и к законам движения планет в частности, открытия Кеплера, новые исследования магнетизма и новое отношение к эксперименту и к развитию науки. Гук, Рен, Галлей, Гюйгенс и другие — все пытались создать единую теорию небесных и земных движений. Каждому из них удалось кое-что сделать в этом направлении, но именно Ньютон дал полное решение этих проблем, единую стройную теорию; это был «не прыжок, а полет».

Научный метод: чувство уверенности

Научное познание — факты, концепции, схемы — строится главным образом из перекрестного процесса исследований и рассуждений с различных точек зрения. Мы не движемся к блестящему открытию напрямик, не сворачивая с пути, а исследуем явления природы сначала в одном направлении, потом в другом; от одной догадки переходим к другой, которую в свою очередь подвергаем проверке, и т. д. Со временем мы напомним новые понятия различными путями и проверим их с различных точек зрения; согласие между результатами, полученными различными методами исследования, дает нам уверенность в том, что достигнутые нами знания имеют надежную основу.

Особенно хорошим примером в этом отношении является современная атомная и ядерная физика. Эту область исследований можно уподобить огромной комнате, в стенах которой имеется, скажем, семь закрытых дверей. Заглянув в одну дверь, ученые видят перед собой микроприроду явлений и ее загадочные проявления. В другую дверь они видят нечто совсем иное, в третью — опять что-то новое, и затем они сравнивают увиденные ими раз-

личные картины. (Например, радиоактивность дает одно представление о природе явлений, электронные пучки — другое; фотоэлектрический эффект ставит перед наблюдателем новые проблемы. Рентгеновские лучи опять дают новую картину; исследуя свойства этих лучей, удастся обнаружить их связь с радиоактивностью, с фотоэлектрическим эффектом; кроме того, с их помощью оказывается возможным получить подтверждение произведенных ранее измерений атомных диаметров.) Наконец, с помощью проверок и сравнений различных точек зрения удастся получить логичную схему, создать некую общую картину, описать микромир. Мы описываем микромир, пользуясь обычными словами, употребляемыми нами при описании окружающего нас «макромира» (атомы имеют *сферическую форму*, электроны имеют *малые размеры*, рентгеновские лучи *распространяются* подобно *видимому свету*). Такое описание не является истинным — что бы мы ни понимали под словом «истинный» — это лишь модель, позволяющая описать то, что нам известно о микромире, обычными словами. Эта схема, наша модель и ее законы — наша описательная теория — до сих пор видоизменяется и расширяется. Если мы откроем новые экспериментальные факты, которые находятся в соответствии с ней, то обрадуемся подтверждению ее правильности. Если же новые факты будут противоречить нашей модели, мы изменим ее, стараясь из-за присущего нам естественного консерватизма держаться возможно ближе к ней. Обнаружив новые факты, выходящие за пределы нашей модели, мы расширим саму модель. (Когда стало известно, что быстрые α -частицы могут свободно проходить через атомы, мы стали считать последние уже не непроницаемыми, как ранее, а полыми шарами.)

В настоящее время наши знания представляют собой обширную систему понятий, которой мы доверяем, так как она удовлетворяет нашим представлениям о ней, составленным на основании самых различных точек зрения. Хотя нам придется подвергать эту систему в будущем значительным изменениям, придется, может быть, изменить всю схему наших представлений об атомной физике, мы все же уже обладаем большим количеством знаний, достоверность которых подтверждается самими различными экспериментами. Для критика извне, которому кажется, что мы смотрим лишь через одну дверь, доказательства, которыми мы располагаем, представляются слишком хрупкими и ненадежными, а наши выводы — умозрительными. Но те, кто создает науку, говорят: «Мы уверены, что стоим на правильном пути, так как, если бы мы в чем-нибудь серьезно ошибались, где-то обязательно проявилась бы

несовместимость, расхождение по крайней мере в одном из направлений наших экспериментальных исследований».

Такое чувство уверенности должно лежать в основе каждого научного метода. Эрнст Нагель утверждает, что если существует единый научный метод, то он должен заключаться в той взаимной проверке и перепроверке с помощью рассуждений, проводимых с различных точек зрения, и экспериментов, в результате которых ученые приходят к убеждению в правильности своих выводов.

Понимание — это полуфабрикат. Модели

Вот почему наука кажется сначала трудной для понимания и изучения: мы последовательно приобретаем знания, рассматривая повторно проблему с иной точки зрения, и именно поэтому верим в ее надежность. Мы не обязательно считаем, что полученная нами картина природы буквально совпадает с реально существующим миром. Многие ученые считают, что это всего лишь рабочая модель.

Легко видеть, что наше представление о строении атома только модель — невидимый атом описывается с помощью таких макроскопических понятий, как снаряды, бейсбольные шары, силы, действующие между магнитами, или же сила тяжести и т. д. Однако неловко признаться в том, что мы не знаем, что в действительности представляет собой атом, а можем лишь сказать, что он «ведет себя так, как если бы...». Более того, с прогрессом техники, с появлением микроскопа... электронного микроскопа... ионного микроскопа... можно подумать, что мы видим реальные атомы, а не их модели — например, в конце нашей книги мы приводим *фотоснимок* атомов вольфрама. Однако такое «наблюдение» микромира, каким бы очевидным оно ни казалось, все же не является непосредственным. Получаемые нами изображения следует интерпретировать в рамках тех моделей, которые определяют использование нами соответствующих приборов. В случайной беседе мы часто говорим: «Теперь мы знаем, что представляют собой атомы, как они расположены, как они движутся», но при серьезной дискуссии большинство ученых скажет: «Мы лишь показали, что наша модель хорошо работает, и получили некоторые подтверждения ее применимости». Мы пользуемся моделями почти во всех научных представлениях: атомы, молекулы, гравитация, магнитные поля, идеальные пружины... Моделями мы пользуемся для того, чтобы заменить плоглей.

Поскольку теория в значительной степени состоит из моделей, основанных на ряде фактов, мы всегда можем внести в нее измене-

ния. Согласно авторам некоторых популярных книг, ученые весело и беспечно отбрасывают свои теории, когда появляются противоречащие им новые открытия; в действительности же большинство ученых отчаянно цепляется за старые теории. Когда ученые вынуждены изменять свои теории в соответствии с новыми данными, это происходит чаще эволюционным, а не революционным путем.

«Решающие эксперименты»

Иногда конкурирующие между собой теории приводят к различным следствиям; тогда можно решить, которая из них правильна, поставив «решающий эксперимент»¹⁾. Даже в этом случае

¹⁾ С прекрасным примером решающего эксперимента мы встречаемся в истории оптики. Двести лет назад существовали две точки зрения на природу света: корпускулярная теория Ньютона и волновая теория Гука и Гюйгенса. Обе теории объясняли общие свойства поведения световых лучей, например отражение и преломление, но вместе с тем исследование второго явления — преломления — могло служить решающей проверкой того, какая из двух теорий правильна.

Когда световые лучи падают под углом на поверхность воды, ихклон изменяется (направление луча приближается к направлению нормали к поверхности воды). Это изменение направления луча на границе двух сред называется *преломлением*; оно было хорошо известно как свойство света на протяжении тысячелетий. Птолемей вывел приближенный закон для угла преломления, а Снеллиус установил точный закон преломления за 50 лет до того, как Ньютон написал свою «Оптику». Обе теории — и Ньютона и Гюйгенса — объясняли преломление света и обе предсказывали закон Снеллиуса:

А. Корпускулы света должны притягиваться водой по мере приближения к ее поверхности (подобно молекуле пара, возвращающейся в жидкость). Тогда их количество движения изменится следующим образом:

- 1) вертикальная компонента количества движения возрастет (под действием сил притяжения);
- 2) горизонтальная компонента останется неизменной (из соображений симметрии). В результате направление потока корпускул в воде приблизится к нормали к ее поверхности, т. е. будет наблюдаться преломление. Из геометрических соотношений вытекает закон Снеллиуса.

При таком изменении количества движения корпускулы должны двигаться в воде *быстрее*, чем в воздухе.

Б. Согласно волновой теории, гребни падающих световых волн должны задерживаться; попадая на поверхность воды, они должны поворачиваться и распространяться в воде по направлению, лежащему ближе к нормали. Отсюда следует, что световые волны должны распространяться в воде *медленнее*, чем в воздухе.

Сравнение скорости света в воде и в воздухе могло бы стать решающим экспериментом при проверке правильности этих теорий. Такой решающий эксперимент был произведен Фуко лишь в 1850 г. — через полтора столетия после Ньютона, Гука и Гюйгенса. Фуко показал, что свет распространяется в воде медленнее, чем в воздухе. Таким образом, вопрос был решен не в поль-

решение не абсолютно достоверно: отвергнутую теорию обычно можно переделать — ей можно придать такую форму, которая выдержит проверку, подобно тому как демонов всегда можно наделять добавочными свойствами. Например, опыт Ньютона со свободным падением монеты и пера в пустоте дает ответ, какая из двух теорий падения правильна:

- I. «Все тела падают с одинаковым ускорением, если не принимать во внимание сопротивление воздуха».
- II. «Тела падают вниз со скоростью, пропорциональной их весу».

Однако вторую теорию можно привести в согласие с экспериментом, считая действие вакуумного насоса не полезным, а вредным: «Тела... весу; но вакуум также действует с силой, направленной вниз и обратно пропорциональной весу тел».

(При опыте с барометром получается нечто еще более фантастическое.)

Только в немногих важных случаях решение представляется окончательным, например при решении вопроса о том, в какой форме происходит перенос световой энергии — волнами или корпускулами (квантами). Фотоэлектрический эффект решительно свидетельствует в пользу квантов; при проверке специальной теории относительности в опытах со скоростью света решение также кажется однозначным. Однако даже в этих столь важных случаях решение вопроса определяется скорее относительным значением различных экспериментов, нежели неопровержимой проверкой с помощью одного-единственного эксперимента.

Интеллектуальное удовлетворение

Итак, проверкой качества теории служит не ее успех или неудача, а простота и экономичность по сравнению со все возрастающей сложностью или громоздкостью. Лучшая теория та, которая

зу теорий корпускул, но только не в пользу данной частной модели, т. е. корпускул, имеющих постоянную массу и движущихся в воде с возрастающими скоростью, количеством движения и энергией. Возьмем вместо этого корпускулы, которые имеют одну и ту же энергию в воздухе и в воде, но масса которых изменяется при их попадании в воду. Тогда мы сможем сформулировать теорию, которая предскажет закон Снеллиуса и согласно которой корпускулы будут двигаться в воде медленнее, чем в воздухе. В этом случае найти выход из положения было легко, хотя результат получался неправильный; однако почти всякая теория может пережить свое осуждение «решающим экспериментом», прибегнув к сложным усовершенствованиям или изменениям.

наиболее плодотворна, экономична, доступна и приносит наибольшее интеллектуальное удовлетворение.

Мы рассчитываем, что теория (или схема) будет давать плодотворные предсказания и объяснения, основываясь по возможности на минимальном числе допущений общего характера.

Следует помнить, что научное «объяснение» нельзя считать ни окончательным и бесспорным ответом на вопрос «почему», ни простым словосочетанием, описывающим наблюдаемые явления с помощью технических терминов. Оно представляет собой звено, связывающее наблюдаемые явления с другими хорошо известными фактами или сведениями более общего характера, полученными из наблюдений. Чем больше число связанных между собой таким образом фактов и чем они разнообразнее, тем большее чувство удовлетворения дает нам наша теория. По мере того как наше доверие к ней возрастает, мы начинаем «объяснять» некоторые факты, связывая их с умозраительными предположениями, следующими из нашей теории. Однако эти предположения связаны в свою очередь с экспериментальными данными, лежащими в основе нашей теории; это по существу такого же рода «объяснение», только основанное в данном случае на нашей вере в ее справедливость.

При создании теории мы начинаем с практических допущений и простых концепций, тесно связанных с экспериментом; затем мы строим концепции более общего характера, которые управляют более простыми, и, наконец, стараемся вывести всю картину природы в целом из нескольких общих концепций.

Мы оцениваем качество теории главным образом по чувству интеллектуального удовлетворения, которое она нам дает,— чувству уверенности в наших знаниях и чувству удовольствия от того, что мы можем их выразить в логичной и компактной форме. Создание такой теории, которая давала бы нам сильнейшее чувство удовлетворения и уверенности в наших знаниях,— это настоящее искусство; это то, что мы называем познанием природы.

«Если бы бог держал в своей правой руке всю истину, а в левой — только вечное стремление ее отыскать, с условием, что при этом всегда будут неизбежные ошибки, и сказал бы мне: «Выбирай!», я смиренно указал бы на левую руку и сказал бы: «Создатель! Отдай мне то, что находится в этой руке; абсолютная истина существует лишь для одного тебя».

Лессинг, 1778

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

МОЛЕКУЛЫ И ЭНЕРГИЯ

Астрономия... Механика... молекулы и энергия... Электричество... Атомы

«Всякая наука открывает вещи, которые далеко выходят за пределы непосредственных наблюдений. Не в наших силах увидеть энергию, гравитационное притяжение, летающие молекулы газа или светоносного эфира, точно так же как нам не дано никогда увидеть леса каменноугольной эры или возбуждения первичных клеток. Это лишь предпосылки науки, а не ее выводы, которые можно наблюдать непосредственно».

К. С. Перс (1898 г.)
Американский философ

Эта и последующая части охватывают столетие, богатое достижениями науки, когда был заложен фундамент современной атомной физики. Кинетическая теория газов и закон сохранения энергии стали мощным орудием исследования и дали толчок к развитию важных идей. Новые данные и методы исследования появились в разделе «Электричество».

«Констатине это загадочно, — заметил Ватсон. — Как вы думаете, что бы это могло означать?»

«Пока у меня нет фактов, — сказал Холмс. — Строить же теорию, не имея фактов, — большая ошибка. Невольно начинаешь толкать факты под теорию вместо того, чтобы объяснять теорией факты».

А. Конан Дойль, «Шерлок Холмс»

Теория всемирного тяготения Ньютона приобрела мировую известность. Его «Принципы» выдержали три прижизненных издания. Популяризация книги стала модной при королевских дворах Европы. Объяснение «Принципов» для широкого круга читателей написал сам Вольтер. Была издана даже «Теория Ньютона в изложении для дам». На образованных людей теория Ньютона произвела впечатление не только способностью блестяще навести порядок «на небесах», но и тем, что она явилась предвестником грядущих великих открытий. Мы считаем теорию Ньютона правильной, ибо она оказалась простой, плодотворной и связала воедино множество различных явлений, дав людям глубокое понимание.

Теория проста, ибо основана на ряде четких утверждений. Эта простота не нарушается тем, что получение некоторых выводов требует использования сложной математики. Успех теории Ньютона породил попытки создать другие теории, в основе которых лежали бы также законы движения. Например, очень простым кажется поведение газов. Нельзя ли построить такую теорию, которая «предсказывала» бы закон Бойля и приводила бы к другим следствиям, обогащая наше понимание?

Такие попытки привели к созданию кинетической теории газов. Суть ее заключается в идее, которая, если вдуматься, как и большинство великих открытий, довольно проста: давление газа есть результат бомбардировки стенок мельчайшими частичками, «молекулами», газа. Газы обладают простыми свойствами. Они всегда заполняют сосуд и в отличие от твердых тел или жидкостей

оказывают одинаковое давление на все стенки сосуда. При постоянной температуре произведение (*давление*) $\times$ (*объем газа*) остается постоянным независимо от того, сжат ли газ или разрежен. Нагревание газов увеличивает либо их давление, либо объем, либо и то и другое, но происходит это у всех газов одинаково. Газы подвижны, легко проникают друг в друга и просачиваются через поры в стенках. Можно ли «объяснить» эти свойства на основе механической картины? Последователи Ньютона возродили идею греческих философов о том, что вещество состоит из «атомов огня», находящихся в постоянном движении. Теперь, вооруженные механикой, они могли придать этой картине реальный смысл и выяснить, на что же способны «атомы». Наиболее поразительным свойством, которое смогла объяснить такая теория, был закон Бойля.

Закон Бойля

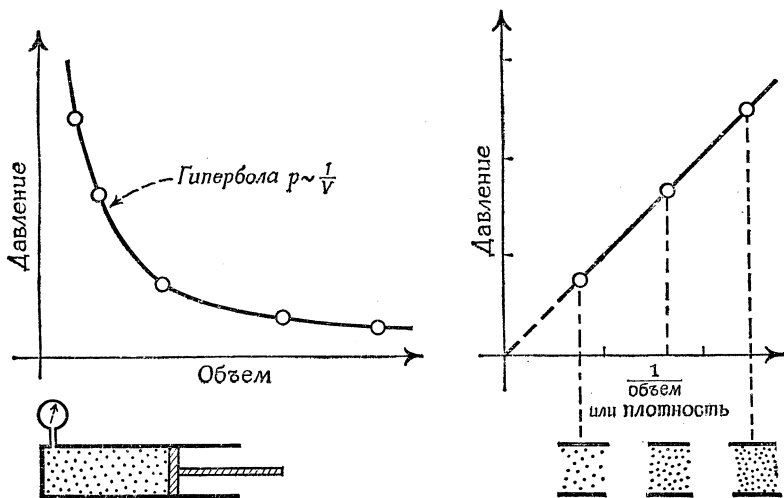
В 1661 г. Бойль «не без удовлетворения и восхищения» объявил о сделанном им открытии — давление и объем находятся «в обратной пропорции». Этим он хотел сказать: (*давление*) $\sim$ ($1/\text{объем}$) или при сжатии воздуха произведение (*давление*) $\times$ (*объем*) остается постоянным. Тот факт, что воздух при нагревании расширяется, был хорошо известен, так что необходимость оговорки «при постоянной температуре» была очевидна. Так Бойль открыл «воздушную пружину» — пружину, которая в отличие от твердой пружины Гука обладает переменной жесткостью.

В лаборатории вам, вероятно, приходилось знакомиться с «опытом Бойля» на примере сухого воздуха, но это делалось не для того, чтобы «открыть» известный закон, а в качестве упражнения для проверки вашего «искусства в обращении с природой». Вы были ограничены малыми изменениями давления (скажем, от $1\frac{1}{2}$ до 2 атм), и точность лимитировалась колебаниями комнатной температуры и конусообразностью стеклянного цилиндра, содержащего газ¹⁾. Если отложить на графике зависимость *давления* от *объема*, то окажется, что точки лягут на гиперболу. Однако трудно быть уверенным, что получилась именно гипербола, и считать, что мы под-

¹⁾ Даже современные стеклянные цилиндры имеют слегка конусообразную форму, за исключением тех случаев, когда для их изготовления используется специальный дорогостоящий процесс; поэтому если эксперименты «по проверке закона Бойля» дают отклонение от закона $pV=\text{const}$, то это обычно объясняют несовершенством цилиндров, а не особым поведением воздуха. Если воздух заменить другим газом, скажем CO_2 , или органическими парами, то появляется истинное отклонение от закона Бойля (см. гл. 30).

твердили закон Бойля ¹⁾. Поэтому лучше откладывать зависимость давления от $1/\text{объем}$ и искать прямую линию, проходящую через начало координат.

Измерения, проведенные Бойлем, не были очень точны и ограничивались давлением от доли атмосферы до 4 атм. Если вы проведете более точные измерения, то обнаружите, что pV меняется



Фиг. 1. Закон Бойля.

лишь на десятые доли процента. На вашем графике зависимости p от $1/V$ экспериментальные точки лягут весьма близко к теоретической прямой, проходящей через начало координат.

Поскольку (масса)/(объем) есть плотность, а масса постоянна, то величина $1/V$ характеризует плотность, и закон Бойля гласит:

ДАВЛЕНИЕ ~ ПЛОТНОСТЬ.

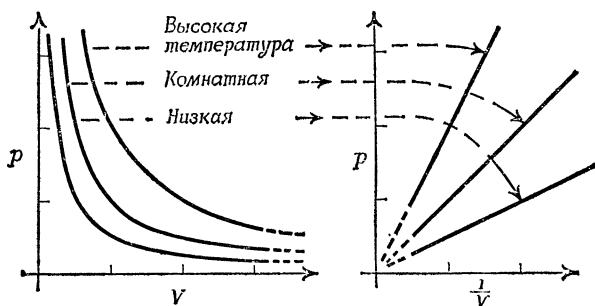
В этом и состоит смысл следующего утверждения элементарной теории газов: «если поместить в ящик вдвое больше молекул, давление увеличится ровно вдвое».

При проверке закона Бойля все измерения делаются *при одной и той же температуре*, т. е. линии на графике являются изотер-

¹⁾ Для проверки или установления закона более удобны графики в форме прямой линии.

мами. Разумеется, на одной диаграмме мы можем изобразить несколько изотерм, как на фиг. 2.

Однако с расширением области давлений наблюдаются заметные отклонения от закона Бойля. Этот закон лишь приближенно описывает поведение реальных газов. Он оказывается точным при малых давлениях и нарушается при больших, когда газ сжимается

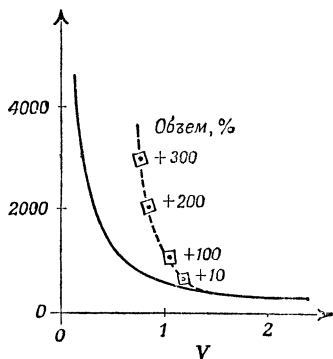
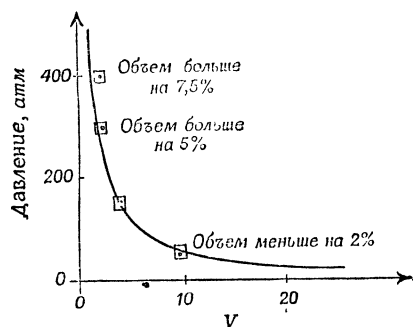
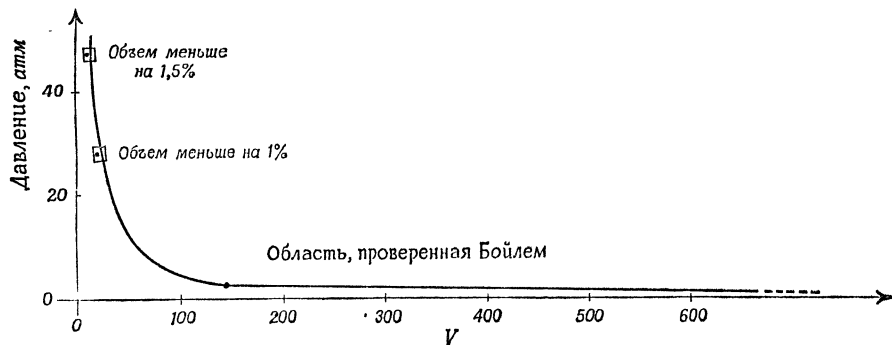
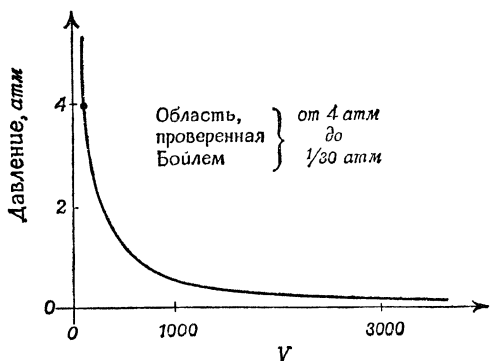


Фиг. 2. Изотермы (закон Бойля).

до высокой плотности. На фиг. 3 показаны экспериментальные данные при давлениях вплоть до 3000 атм. (Графики, описывающие поведение CO_2 вплоть до ожиджения, приведены в гл. 30.)

Теория

Бойль пытался угадать механизм, лежащий в основе его закона. Будучи хорошим химиком, он представил себе, что закон обусловлен поведением крохотных частичек. Частички газа, думал он, сопротивляются давлению, подобно груде маленьких шариков свалившейся шерсти. Ньютон пошел дальше и вычислил силу отталкивания, необходимую для объяснения закона Бойля. Затем Д. Бернулли опубликовал свою теорию, которая предсказывала закон Бойля, не используя каких-либо специальных сил. Он показал, что *движущиеся* частицы, бомбардируя стенки сосуда, должны производить давление; он предположил также, что нагревание газа заставляет частицы двигаться быстрее. Это было началом современной теории. Попытка была смелая, но рассмотрение оказалось неполным. Лишь спустя столетие, в 1840 г., Джоуль и другие создали «кинетическую теорию газов», в основе которой лежало следующее утверждение:



Фиг. 3. Отклонения от закона Бойля для воздуха при комнатной температуре. Кривые дают зависимость давления от объема для идеального газа, подчиняющегося закону Бойля. Точки показывают поведение воздуха и при малых давлениях неотличимы от кривых. Масштаб по горизонтальной оси растягивается в 10 раз, а по вертикальной оси сжимается в 10 раз.

Газ состоит из мельчайших упругих частиц, находящихся в быстром движении, а давление газа на стенки есть просто результат бомбардировки их этими частицами.

Джоуль показал, что такая теория может «объяснить» закон Бойля и дает важные сведения о самих частицах газа. Вскоре эта идея благодаря усилиям математиков и физиков превратилась в блестящую теорию, которая обогатила наше миропонимание.

Движущиеся частицы газа мы называем *молекулами*. Название это пришло из химии, где оно означает мельчайшие частицы вещества, которые могут еще существовать самостоятельно. Расщепите молекулу и вы получите отдельные атомы, свойства которых будут отличаться от свойств первоначального вещества. Так, молекула воды, H_2O , дает два атома водорода и один кислорода, свойства которых отличны от свойств молекулы воды. Предоставленные самим себе отдельные атомы группируются в пары H_2 и O_2 — молекулы газов водорода и кислорода. В кинетической теории газов мы имеем дело с молекулами и предполагаем, что они не расщепляются при соударениях. Кроме того, мы считаем, что молекулы действуют друг на друга лишь в момент соударения; когда они оказываются достаточно близко друг к другу, они испытывают действие отталкивающей силы, но на очень короткое время. В этом фактически и заключается соударение.

Теперь вы имеете все необходимое для построения кинетической теории газов. Попробуйте сделать это. Предположите, что давление газа обусловлено упругими ударами молекул в стенки сосуда. Первый этап состоит в проработке задач 1 и 2. Они начинаются со столкновений шариков и кончаются бомбардировкой молекулами, и это позволяет предсказать поведение газов. После того как вы осилите задачи, возвращайтесь к обсуждению деталей.

Приведенные ниже задачи помогут вам построить кинетическую теорию газов.

Успех планетарной теории Ньютона стимулировал попытки построить другие теории, основанные на ньютоновых законах движения и ряде очевидных предположений. Теория газов рассматривает газ как скопление мельчайших молекул, очень часто сталкивающихся друг с другом. Приписывая молекулам некоторые простые свойства (включая основное предположение, что они существуют!) и допуская, что к ним применимы законы движения Ньютона, удалось вывести (предсказать) закон Бойля и многие свойства газов. Как и в большинстве теорий, для получения выводов мы на основании неких предположений должны проделать ряд вычислений. Чтобы облегчить эти вычисления, вам предлагается серия задач о столкновении шарика. Они подведут вас к вычислениям, которые дадут ценные предсказания. Основные вы-

числения могут показаться сначала трудноватыми просто потому, что они относятся к таинственным молекулам, но если, проделав вычисления, вы на время оставите их, то вскоре убедитесь, что они были вполне осмысленными.

Задача 1

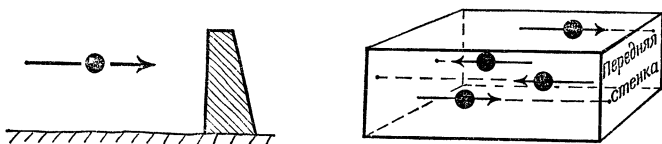
I. Обмен импульсом (количеством движения)

Шарик массой 2 кг, двигаясь со скоростью 12 м/сек, ударяется под прямым углом в массивную стенку и останавливается.

- 1) Импульс шарика до соударения равен (единиц).
- 2) Импульс шарика после соударения равен (единиц).
- 3) Изменение импульса шарика равно (единиц).
- 4) Если третий закон Ньютона, который управляет соударением тел, верен и применим в этом случае, то мы можем сказать, что изменение импульса стенки (и того, с чем она скреплена) должно быть (единиц).

II. Сила, которую оказывают ударяющие о стенку шарики

Предположим, что о стенку ударяется множество шариков массой 2 кг каждый, движущихся со скоростью 12 м/сек. Пусть в течение 10 сек о стенку ударяются и останавливаются 1000 таких шариков. Каково будет оказываемое ими давление на стенку?



Фиг. 4. Сосуд содержит шарики или молекулы, которые движутся взад и вперед между стенками и своими ударами создают давление.

Вычисляется давление на переднюю стенку.

Полное приращение импульса стенки (за период 10 сек) равно
..... (единиц).

(П р и м е ч а н и е. На самом деле изменение импульса происходит скачкообразно: один скачок за каждый удар шарика о стенку, но можно вычислить полное приращение импульса и, используя его, подсчитать среднюю силу, т. е. силу, усредняющую эти скачки за весь период 10 сек. Чтобы найти величину этих скачков, необходимо знать время, которое требуется шарiku, чтобы потерять свой импульс, другими словами, — длительность отдельного соударения. Это время не дано, так что можно вычислить только среднюю величину силы.)

Средняя сила, действующая на стенку в течение 10 сек из-за потери 1000 шариками своего импульса, находится из формулы $F \cdot t = \Delta(mv)$. Средняя сила, F , действующая на стенку, должна быть равна (единиц).

(Заметьте, что соотношение $F \cdot t = \Delta(mv)$ есть не что иное, как второй закон Ньютона. Поэтому используемые в нем силы должны выражаться в абсолютных единицах, как и в законе $F = m \cdot a$, т. е. в ньютонах.)

III. Сила, действующая на стенку при ударе упругих шаров

Предположим, что, как и в предыдущей части задачи, 1000 шариков массой 2 кг каждый в течение 10 сек падают на массивную стенку перпендикулярно ее поверхности, но на этот раз они отскакивают назад с той же скоростью 12 м/сек.

1) Импульс каждого шарика до соударения _____ . (единиц)

2) Импульс каждого шарика после соударения _____ . (единиц)

(Помните, что импульс есть вектор. Не забывайте знаков $+$ и $-$!)

3) Приращение импульса одного шарика равно _____ . (единиц)

4) Изменение импульса стенки равно _____ . (единиц)

(Примечание. Ответ не будет равен нулю.)

5) Если в течение 10 сек о стенку ударяется и отскакивает 1000 шариков, то полное изменение импульса стенки равно _____ . (единиц)

6) Средняя сила, действующая на стенку на протяжении 10 сек, равна _____ . (единиц)

7) Если все 1000 шариков ударяются об участок стенки высотой 2 м и шириной 3 м, то среднее давление (= сила/площадь) на этом участке равно _____ . (единиц)

IV. Движение внутри ящика

Прежде чем заменить упругие шарики молекулами, мы должны поместить их в закрытый ящик. Возьмем продолговатый ящик длиной 4 м с единственным шариком внутри, который движется из конца в конец со скоростью 12 м/сек. Он ударяется перпендикулярно каждой из стенок и со скоростью 12 м/сек отскакивает в противоположную сторону. Теперь уже один и тот же шарик будет ударяться о каждую стенку много раз за 10 сек. Вместо того чтобы брать число шариков, ударяющихся о стенку, мы можем воспользоваться числом ударов, производимых одним шариком. Для нахождения силы, действующей на стенку, нужно считать удары только об эту стенку.

1) Между двумя последовательными ударами о стенку ящика шарик проойдет расстояние туда и обратно, т. е. от передней стенки к задней и от задней к передней. Таким образом, он проходит _____ м.

2) При скорости 12 м/сек полное расстояние, пройденное шариком за 10 сек, равно _____ м.

3) Сколько раз шарик пройдет туда и обратно за 10 сек?

4) Сколько раз шарик ударится о переднюю стенку за 10 сек?

Таким образом, для получения 1000 ударов за 10 сек в ящике должно быть несколько шариков. На самом деле нужно примерно _____ шариков.

5) При каждом ударе о переднюю стенку импульс каждого шарика изменяется на _____ . (единиц)

6) За 10 сек шарик ударяется _____ раз о переднюю стенку ящика, и при каждом ударе импульс меняется на _____. (единиц)

Полное приращение импульса передней стенки ящика за 10 сек равно _____. (единиц)

Полная сила, действующая на переднюю стенку в течение 10 сек, равна _____. (единиц)

(Давление определяется как сила/площадь, так что, если известна площадь, можно вычислить давление (среднее), вызванное ударами шарика. В нашем случае нет смысла вычислять давление, оказываемое одним шариком, можно проделывать аналогичные вычисления для молекул и предсказать таким образом давление газа.)

Теперь проведем аналогичные вычисления для молекул газа в сосуде. Позднее мы повторим их с помощью алгебры (задача 2).

V. Молекулы газа в сосуде

Металлический сосуд длиной 4 м со стенкой $3 \text{ м} \times 2 \text{ м}$ содержит одну молекулу газа, которая движется взад и вперед вдоль сосуда со скоростью 500 м/сек, упруго отскакивая от его стенок. Молекула приближается к одной стенке, ударяется о нее и, отразившись, летит с той же скоростью к другой стенке, снова ударяется и опять отскакивает с прежней скоростью 500 м/сек. Масса молекул примерно равна $5 \cdot 10^{-26}$ кг.

(П р и м е ч а н и е. Простые химические измерения показывают, что молекулы кислорода и азота (в воздухе) приблизительно в 30 раз тяжелее атома водорода. Сложные физические измерения говорят нам, что масса атома водорода равна $1,67 \cdot 10^{-27}$ кг.)

1) При ударе о переднюю стенку и отскоке импульс молекулы изменяется на _____. (единиц)

2) За 10 сек молекула проходит расстояние _____ м.

3) Между двумя последовательными соударениями о переднюю стенку молекула успевает долететь до другой стенки и вернуться назад, т. е. пройти расстояние _____ м.

4) В течение 10 сек молекула _____ раз пролетит туда и обратно и, следовательно, совершит такое же число ударов о переднюю стенку.

5) За 10 сек молекула _____ раз ударится о переднюю стенку, изменяя свой импульс при каждом ударе на _____. (единиц)

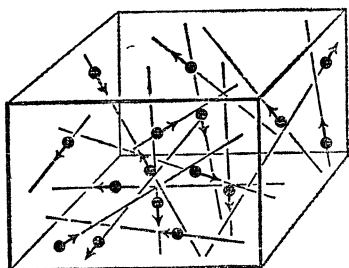
6) Полное изменение импульса передней стенки за 10 сек равно _____. (единиц)

7) Средняя сила, действующая на протяжении 10 сек на переднюю стенку сосуда, равна _____. (единиц)

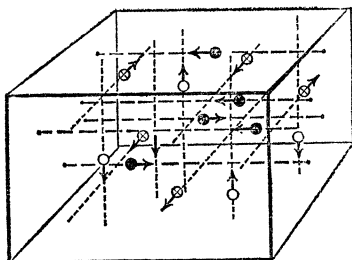
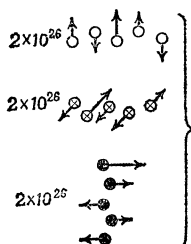
8) Давление равно (сила/площадь). Стенка имеет площадь $2 \times 3 \text{ м}^2$. Среднее давление на стенку равно _____. (единиц)

VI. Множество молекул в сосуде

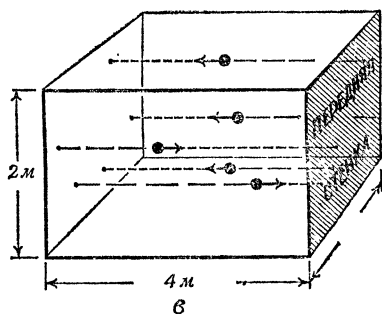
1) Предположим теперь, что сосуд содержит $6 \cdot 10^{26}$ молекул (600 000 000 000 000 000 000 000 000 000). Это приблизительно соответствует реальному числу молекул в таком сосуде, если наполнить его



a



б



в

Фиг. 5. К задаче 1.

Вместо случайных направлений движения, как изображено здесь (*a*), потребуем, чтобы были три группы (*б*) по $2 \cdot 10^{26}$ молекул, движущихся параллельно граням сосуда. Теперь предположим, что давление на переднюю стенку создается ударами одной группы молекул ($2 \cdot 10^{26}$), движущихся взад и вперед (*в*).

воздухом при атмосферном давлении ¹⁾. В действительности же они хаотически движутся во всех направлениях, но для упрощения вычислений примем, что они рассортированы на три независимые группы, причем одна группа летает вверх — вниз, другая направо и налево, а третья — взад и вперед. Из соображения симметрии молекулы должны быть поровну распределены между тремя группами (фиг. 5). Давление на переднюю стенку сосуда обуславливается только ударами молекул, движущихся взад и вперед. Продолжим вычисление давления, учитывая только треть всех молекул в сосуде, т. е. $2 \cdot 10^{26}$, или 200 000 000 000 000 000 000 000 молекул, которые движутся со скоростью 500 м/сек вдоль 4-метрового сосуда, ударяются о его переднюю стенку, отскакивают со скоростью 500 м/сек, ударяются о заднюю стенку, отскакивают и так далее.

Используя результат части IV задачи, мы можем показать, что среднее давление на стенку сосуда будет равно _____.

(единиц)

(Эти данные описывают поведение воздуха в комнате. Какую величину атмосферного давления в тех же самых единицах показывает барометр?) Каково отношение вычисленного выше давления к атмосферному, измеренному в лаборатории?

2) Предположим, что передняя и задняя стенки сосуда сблизились так, что длина сосуда сократилась до 2 м (т. е. до половины первоначальной длины) без изменения числа молекул, их скорости и площади этих стенок.

Среднее давление на переднюю стенку равно _____.

(единиц)

(П р и м е ч а н и е. Арифметика в п. 2 почти та же, что и в п. 1. Решите и получите новый ответ.)

а) Вычислите давление p .

б) Вычислите произведение (давление) $\times$ (объем), умножив p на abc .

в) Повторите все решения с помощью алгебры. Возьмите сосуд длиной a , шириной b и высотой c , содержащий N молекул, движущихся со скоростью v м/сек.

Задача 2. Кинетическая теория газов (алгебра)

(Рассмотрим поведение молекул в сосуде на основе алгебры. К задаче следует приступить после того, как сделана и проверена задача 1.) Предположим, что в сосуде заключено N молекул (N молекул во всем сосуде, а не в каждом кубическом метре). Пусть длина сосуда равна a м, а размер передней и задней стенок $b \times c$ м². В процессе хаотического движения со множеством соударений молекулы обмениваются импульсами и скорость их не остается постоянной. Однако мы полагаем, что если температура поддерживается постоянной, то их скорость близка

¹⁾ Химики часто имеют дело с «молем», или «грамм-молекулой», газа. Моль любого газа занимает 22,4 л при атмосферном давлении и температуре тающего льда. При комнатной температуре (и 1 атм) моль занимает около 24 л. Здесь мы выбрали 1000 молей, т. е. «киломолей», или «килограмм-молекула», которые занимают 24 000 л, или 24 м³, при комнатной температуре (примерно 20° С).

к некой средней скорости, которую мы обозначим через v м/сек. Чтобы вычислить давление на стенку сосуда, мы должны учитывать только удары об эту стенку. Таким образом, для упрощения задачи мы считаем, что N молекул подразделяются на три равные группы, одна из которых движется вверх и вниз, другая влево и вправо, а третья — взад и вперед. При вычислении давления на переднюю стенку мы учитываем только последнюю группу. Из соображения симметрии все N молекул должны делиться между этими тремя группами поровну. Приняв эти предположения, ответьте на следующие вопросы, считая, что масса одной молекулы равна m кг.

1) При лобовом ударе молекулы о переднюю стенку и отражении изменение импульса равно _____.

2) Между двумя последовательными ударами о переднюю стенку молекула летит к задней стенке и возвращается, проходя полное расстояние _____ м.

3) За время t сек молекула, летящая со скоростью v м/сек, проходит расстояние _____ м.

4) Таким образом, в течение t сек молекула _____ раз возвратится назад и столько же раз ударится о переднюю стенку.

5) За время t сек молекула _____ раз ударится о переднюю стенку, передавая при каждом ударе импульс _____.

6) Таким образом, полное изменение импульса передней стенки из-за ударов одной молекулы за время t сек равно _____.

7) Но в сосуде находится N молекул, из которых _____ движутся взад и вперед. Полное изменение импульса передней стенки из-за ударов всех молекул в течение t сек равно _____.

8) Но $Ft = \Delta$ (импульс), т. е. $F = \Delta$ (импульс)/ t , а в нашем случае средняя сила, действующая на переднюю стенку сосуда на протяжении t сек, равна ¹⁾ _____.

9) Давление = (сила)/(площадь), а площадь передней стенки равна _____.

Таким образом, среднее давление на переднюю стенку равно _____.

10) Объем сосуда равен _____ м³.

Таким образом, произведение (давление) · (объем) = _____.

Но m — масса одной молекулы, а их всего N , так что полная масса газа в сосуде, M кг = _____ кг.

Подставляя M в написанное выражение, находим:

(давление) · (объем) = _____.

11) Если мы работаем с закрытым сосудом, исключаяющим утечку газа, то масса M постоянна.

Предположим, что температура также поддерживается постоянной. Тогда опыты показывают, что средняя скорость v будет оставаться постоянной. Если объем изменяется, то, согласно п. 10,

12) Если мы измерим объем газа, скажем в колбе, его массу (взвешивая колбу с газом и после его удаления) и с помощью барометра давление, то п. 10 дает возможность получить очень важную информацию —

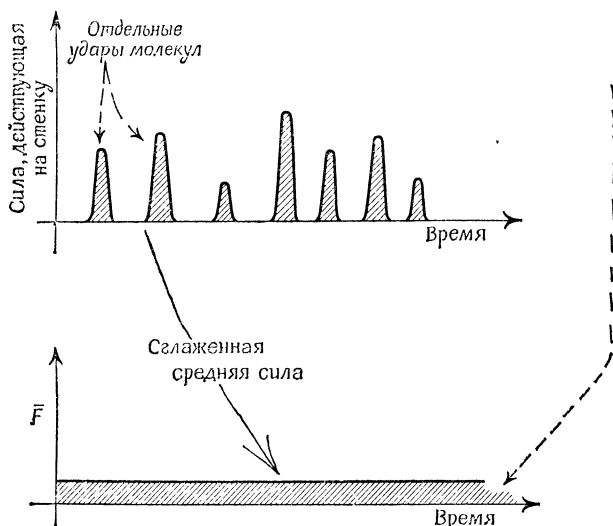
¹⁾ Здесь t — время, в течение которого должна действовать средняя сила, чтобы создать нужное изменение импульса. Следовательно, t — как раз те t сек, за которые произошло вычисленное изменение импульса.

вычислить величину —, которая представляет — молекул.

- 13) Единицы измерения. Если в п. 12 объем брался в м^3 , то массу нужно брать в —, а давление должно измеряться в —.
- 14) Из нашей теории получены два полезных предсказания: посещение газа п. 11 и заключение п. 12. Кроме того, получатся и другие результаты, но за все это нужно заплатить предположениями, которые легли в основу всего механизма. Выпишите на отдельном листе все предположения, сколько сможете,
- относительно общих законов, применяемых к молекулам;
 - относительно предполагаемых свойств молекул, их поведения, размеров и т. д.

Трудности простейшей теории

Выражение, которое вы получили в задаче 2, по-видимому, приводит к непрерывному давлению молекул на стенку, предсказываемому законом Бойля. Но как может град ударов молекул



Фиг. 6. Сглаживание ударов.

Заштрихованная площадь — полная величина $F \cdot \Delta t$.

создать непрерывное давление? Разве что они будут сыпаться с такой частотой, что сольются в постоянную силу. Для этого молекулы газа должны быть очень малы и многочисленны. Если они

малы, то любая твердая преграда наподобие стенок сосуда будет казаться массивной по сравнению с отдельной молекулой. Тогда при соударении стенка сглаживает передаваемые ей импульсы в постоянное давление, которое мы и наблюдаем. (Что бы вы увидели, если бы стенки сосуда были столь же легкими, как сами молекулы?)

В приведенных задачах предполагалось, что молекулы летят от одной стенки к другой, не сталкиваясь по пути друг с другом, а ведь они, разумеется, сталкиваются, и без дальнейшей информации мы не сможем сказать, насколько часто. Как это повлияет на наши предсказания?

Задача 3. Столкновения в простейшей теории

- а) Покажите, что для простых рассуждений в задачах 1 и 2 не имеет значения, сталкиваются молекулы или нет. (Рассмотрите две молекулы, которые движутся взад и вперед, от одной стенки к другой и при встрече проходят друг над другом без соударения. Затем предположите, что они сталкиваются лоб в лоб и отскакивают назад. Почему их вклад в давление не изменится? Объясните это с помощью чертежа.)*
- б) Какие специальные предположения о свойствах молекул требуются для ответа на поставленные выше вопросы?*
- в) Предположим, что молекулы стали очень большими (сохранив, однако, свою скорость, массу и т. д.). Как это повлияет на давление вследствие их соударений? Возрастет ли оно, уменьшится или останется прежним?*
- г) Дайте ясное обоснование вашего ответа на предыдущий вопрос.*

Молекулярный хаос

Молекулы сталкиваются друг с другом и со стенками совершенно случайным образом (лоб в лоб, под углом, вскользь) и поэтому не могут сохранять постоянную скорость v . Одни набирают скорость при соударениях, другие же теряют ее. Газ представляет собой хаос случайно движущихся молекул, скорости которых (при каждом соударении) могут изменяться в широких пределах. Но все же должно соблюдаться некое постоянство — ведь газ оказывает постоянное давление.

Выражение $p \cdot V = \frac{1}{3}(N m \bar{v}^2)$ вовсе не подразумевает, что все N молекул движутся с одной и той же скоростью и каждая дает вклад $m \bar{v}^2$. Мы говорим, что молекула 1 движется со скоростью v_1 , молекула 2 — со скоростью v_2 и т. д., а молекула N — со ско-

ростью v_N . Тогда ¹⁾

$$\begin{aligned} p \cdot V &= \frac{1}{3} (mv_1^2 + mv_2^2 + \dots + mv_N^2) \\ &= \frac{1}{3} [m(v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2)] \\ &= \frac{1}{3} m (N \cdot \text{Среднее } v^2). \end{aligned}$$

Следовательно, v^2 в нашем выражении должно быть средним $\overline{v^2}$. Именно поэтому мы ставим над ней черточку, обозначающую среднее значение. Так что теоретическая формула приобретает вид

$$\text{ДАВЛЕНИЕ} \cdot \text{ОБЪЕМ} = \frac{1}{3} N \cdot m \cdot \overline{v^2}.$$

Мы знаем, что если поместить газ в сосуд, то его давление с течением времени не будет прыгать вверх и вниз; давление и объем остаются постоянными. Следовательно, несмотря на все происходящие при столкновениях изменения, средняя скорость молекулы $\overline{v^2}$ остается постоянной. Таким образом, теория уже помогла нам навести порядок в молекулярном хаосе — получить постоянную $\overline{v^2}$.

Более элегантный вывод

Введение множителя $1/3$ для большинства выглядит как искусственный трюк. Вот более элегантный метод, в котором скорости молекул складываются с помощью простейших правил статистики. Предположим, что молекула 1 движется в сосуде со скоростью v_1 под углом к стенке (фиг. 7). Разложим вектор v_1 на три компоненты по осям x , y и z , параллельным стенкам. Тогда v_1 будет результирующей компонент скоростей xv_1 вдоль оси x , yv_1 вдоль оси y ,

¹⁾ Потому что

$$\begin{aligned} \overline{v^2} &= \frac{\text{Сумма всех } v^2}{\text{Число всех } v^2} \\ &= \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N}, \end{aligned}$$

т. е.

$$(v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2) = N \cdot (\overline{v^2});$$

$\overline{v^2}$ — это среднее значение квадрата скорости. Для получения этой величины нужно взять скорость каждой молекулы в данный момент, возвести ее в квадрат, сложить все квадраты и разделить на число молекул. Или же выбрать одну молекулу и усреднить ее квадрат скорости, скажем, по миллиону соударений.

а $z v_1$ вдоль оси z . Поскольку оси взаимно перпендикулярны, то по теореме Пифагора

$$v_1^2 = x v_1^2 + y v_1^2 + z v_1^2;$$

для молекулы 2

$$v_2^2 = x v_2^2 + y v_2^2 + z v_2^2;$$

для молекулы 3

$$v_3^2 = x v_3^2 + y v_3^2 + z v_3^2$$

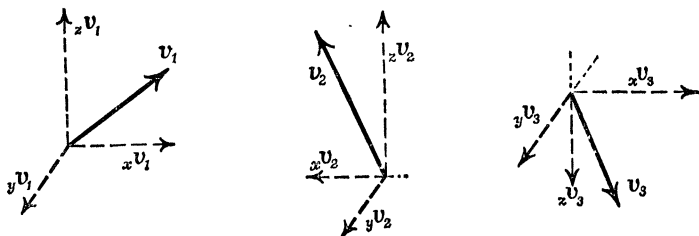
и т. д.

для молекулы N

$$v_N^2 = x v_N^2 + y v_N^2 + z v_N^2.$$

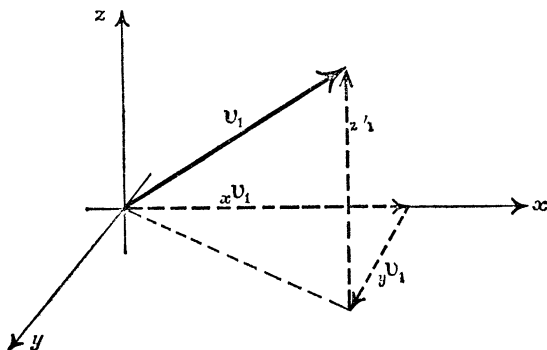
Сложим все эти равенства:

$$\begin{aligned} (v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \dots + v_N^2) &= \\ &= (x v_1^2 + x v_2^2 + x v_3^2 + \dots + x v_N^2) \\ &+ (y v_1^2 + y v_2^2 + y v_3^2 + \dots + y v_N^2) \\ &+ (z v_1^2 + z v_2^2 + z v_3^2 + \dots + z v_N^2). \end{aligned}$$



Фиг. 7. Другое рассмотрение движения молекул газа.

Каждая скорость v разложена на три составляющие xv , yv и zv , параллельные граням сосуда. Затем по xv^2 вычисляется давление и мы приходим к тому же результату.



Фиг. 8. Составляющие скорости.

По теореме Пифагора $v_1^2 = x v_1^2 + y v_1^2 + z v_1^2$.

Разделив на число молекул N , получим *среднее* значение:

$$\overline{v^2} = \overline{xv^2} + \overline{yv^2} + \overline{zv^2}.$$

Призовем теперь на помощь соображения симметрии и потребуем (игнорируя малые отклонения за счет гравитации), чтобы все три средних в правой части уравнения были равными; случайное движение большого числа молекул должно давать одно и то же распределение скоростей в любом направлении:

$$\overline{xv^2} = \overline{yv^2} = \overline{zv^2},$$

т. е.

$$\overline{v^2} = 3\overline{zv^2}.$$

Чтобы получить давление на стенку сосуда, мы будем дальше рассуждать по аналогии с задачей 2, используя xv — составляющую скорости молекулы вдоль сосуда. (Именно эта составляющая скорости и нужна нам, ибо yv и zv влияют только на движение от одной боковой стенки к другой и не участвуют в передаче импульса нашим стенкам.) Поэтому вклад молекулы 1 в произведение (*давление*) · (*объем*) будет $m \cdot xv_1^2$, а вклад всех N молекул будет

$$m(xv_1^2 + xv_2^2 + \dots + xv_N^2), \text{ или } m \cdot N \cdot \overline{xv^2}.$$

Но он равен $mN(\overline{v^2}/3)$, так что

$$\text{ДАВЛЕНИЕ} \cdot \text{ОБЪЕМ} = \frac{1}{3} N \cdot m \cdot \overline{v^2}.$$

Предсказания кинетической теории газов

Рассмотрение молекулярных столкновений и законы Ньютона привели нас к выводу, что

$$\text{ДАВЛЕНИЕ} \cdot \text{ОБЪЕМ} = \frac{1}{3} N \cdot m \cdot \overline{v^2}.$$

Он напоминает закон Бойля. Множитель $1/3$ постоянен; N — число молекул — тоже постоянно (если они не улетают и не распадаются); m — масса молекул — постоянна. Поэтому *если* средняя скорость остается постоянной, то постоянно и $1/3 N m \overline{v^2}$, а следовательно, постоянно и $p \cdot V$, как обнаружил Бойль. Но остается ли неизменной скорость молекул? Сейчас мы не можем гарантировать это. Но давайте на минуту забежим вперед и *предположим*, что молекулярное движение связано с тепловым состоянием газа и что *при постоянной температуре средняя скорость молекул газа постоянна*, как бы мы его ни сжимали¹⁾. Объяснение этого факта вы получите

¹⁾ На самом деле при сжатии газ разогревается, однако мы полагаем, что, когда газ охладится до первоначальной температуры, молекулы вернуться к той же средней скорости, что и до сжатия, хотя им стало гораздо теснее.

позднее, а сейчас примите его на веру. Сделав это, найдем:

Для газа при постоянной температуре
произведение $p \cdot V$ постоянно.

Более простая форма получится, если вместо *объема* изменять *плотность*: удвойте число молекул в том же сосуде, и давление удвоится.

Что это, удивительное объяснение закона Бойля? Едва ли удивительное. Мы вкладывали в него столько предположений, не упуская из виду желаемый результат, что он вряд ли может польстить нашему тщеславию. Теория, вобравшая столько предположений и предсказавшая один-единственный уже известный закон, и то при дополнительном допущении относительно постоянства температуры, вряд ли заслуживает внимания. Но наша теория — это только начало. Кроме того, она позволяет «объяснить» испарение, диффузию, внутреннее трение в газах. Она предсказывает, как ведет себя газ при сжатии, облегчает конструирование вакуумных насосов. Она приводит также к измерениям, подтверждающим законность наших предположений. Однако, прежде чем перейти к дальнейшему развитию теории, остановимся на вопросе: «на самом ли деле существуют такие штуки, как молекулы?»

Существуют ли молекулы?

«Самое страшное — это косвенные улики. Обвинитель имеет в своем распоряжении все средства для расследования. Он вскрывает факты и отбирает только те, которые, по его мнению, существенны. Но если он придет к заключению о виновности подсудимого, то для него существенными фактами будут лишь те, которые указывают на вину подсудимого. Вот почему косвенные улики — ложь. Сами по себе факты не имеют никакого смысла. Объяснение фактов — вот единственное, что принимается в расчет».

Эрл Станли Гарднер

«Дело о попугае — лжесвидетеле»

Сто лет назад молекулы казались полезным понятием. Это была плодотворная концепция, позволившая легко обнаружить закономерности у химических соединений и давшая толчок развитию простейшей теории газов. Но существуют ли молекулы на самом деле? В те времена имелись лишь косвенные улики, которые делали эту гипотезу вероятной. Однако многие ученые были настроены скептически, а один великий химик вплоть до начала этого века даже настаивал на своем праве не верить в молекулы и атомы, хотя при-

мые экспериментальные доказательства появились довольно давно, примерно в 1827 г. Это было броуновское движение.

Броуновское движение

Шотландский ботаник Роберт Броун (1773—1858) сделал удивительное открытие — он увидел молекулярное движение. Рассматривая через микроскоп взвешенные в воде твердые частицы, он обнаружил, что они находятся в беспрестанном движении. Этот танец делал частицы похожими на живые существа, которые ни на минуту не прекращали своего движения. При нагревании танец убыстрался, а после охлаждения замедлялся до первоначального темпа. Теперь мы знаем, что любые твердые частицы в жидкости будут участвовать в точно таком же беспорядочном танце, лишенном ритма и системы. Броун наблюдал результат столкновений молекул воды с твердыми частицами. Их толкали со всех сторон, как толкали бы слона, окажись он на футбольном поле во время матча.

Понаблюдайте сами за «броуновским движением». Посмотрите через сильный микроскоп на частицы сажи в воде. А еще проще, понаблюдайте в небольшой микроскоп за дымом. Наполните черный ящик дымом от сигареты или гаснущей спички и осветите его сбоку сильным светом. Дым рассеивает во всех направлениях голубовато-белый свет, часть которого попадает и в микроскоп. Под микроскопом дым представляется маленькими кусочками белого пепла, которые скачут туда и сюда в совершенно беспорядочном танце¹⁾ (см., например, фиг. 89, стр. 530).

Понаблюдав за частицами пепла, вы поймете, почему Броун сначала принял их за живые существа, но вы можете представить себе, что это движение возникает в результате хаотических ударов молекул воздуха. Сегодня мы не просто считаем, что так может быть, а уверены, что это именно так и есть, ибо способны вычислить действие этих ударов и проверить наши вычисления с помощью наблюдений. Если бы молекул воздуха было очень много и они были бы бесконечно малы, они бомбардировали бы большую частицу пепла симметрично со всех сторон и мы не смогли бы увидеть броуновского движения. Но, с другой стороны, если бы окружаю-

¹⁾ Они могут еще участвовать и в общем движении вследствие конвекции, но это движение легко отличить. Находясь в фокусе, эти кусочки белого пепла выглядят как маленькие, порой удлинённые клочки, когда же в результате конвекции или пляски они выходят из фокуса микроскопа, то превращаются в пушистые круглые шарики, похожие на отдаленные уличные фонари в кино, сияющие не в фокусе.

ций воздух состоял из небольшого числа больших молекул, то частицы непла при ударе молекул совершали бы неожиданные скачки. Ясно, что истина лежит где-то посередине: в сосуде имеется множество молекул, ударяющих частицу непла со всех сторон много раз в секунду. За короткий промежуток времени в нее попадали с каждой стороны сотни молекул, но на одну сторону случайно приходится на несколько сот толчков больше, чем на другую, и частица заметно перемещается. Большие скачки редки, но несколько мелких перемещений в одном и том же направлении превращаются в наблюдаемый сдвиг. Детальные наблюдения и расчеты говорят о том, что под микроскопом мы наблюдаем именно эти результирующие сдвиги. Хотя отдельные перемещения слишком незначительны и мы их не можем разглядеть, все же можно оценить их скорость, записывая и анализируя большие отклонения.

Вы сами увидите, что частицы поменьше танцуют быстрее. А теперь мысленно вообразите, что частицы становятся все меньше и меньше. Какое движение вы увидите, если размеры частиц достигают размеров молекул при условии, конечно, что мы сможем разглядеть саму молекулу? Но можем ли мы увидеть молекулы?

Можно ли увидеть молекулы?

Действительно, можно ли? А это было бы очень полезно. Мы уверены, что то, что мы *видим*, существует на самом деле, хотя имеется множество оптических иллюзий. Все исследования молекул, проведенные на протяжении прошлого века, привели ученых к заключению, что увидеть молекулы — дело безнадежное. Не просто маловероятно, а именно невозможно, и по веским физическим причинам. Мы реагируем на свет, который представляет собой волны с очень малой длиной волны — всего лишь несколько тысяч ангстрем от гребня до гребня¹⁾. Эти волны и создают видимое изображение.

Невооруженным глазом мы различаем форму булавочной головки с перечником в 1 мм, или 10 000 000 Å;

с помощью увеличительного стекла можем разглядеть волос толщиной 1 000 000 Å;

с помощью слабого микроскопа видим частицы дыма размером 100 000 Å;

с помощью сильного микроскопа видим бактерии размером от 10 000 до 1000 Å.

Но на этом ряд обрывается. Он должен оборваться — его ограничивает длина волны видимого света. Волны могут сделать видимыми препятствия, которые по своим размерам больше или порядка их длины. Например, океанские волны оставляют за островом ясно видимую тень спокойной воды. На меньшие препятствия они реагируют совсем по-другому. Встречая небольшое деревянное бревно, океанские волны не образуют за ним никакой тени. Они просто обтекают бревно и смыкаются за ним, как будто его и нет совсем. Слспой,

¹⁾ 1 ангстрем (1Å) равен 10^{-10} м.

бредущий по берегу штормового моря, может почувствовать присутствие близлежащего острова, но никогда не узнает о маленьком бревне, которое находится где-то тут же возле него ¹⁾.

Длины световых волн лежат в пределах от 7000 Å для красного света до 4000 Å — для фиолетового. Попытка проникнуть в область коротковолнового ультрафиолета путем применения фотоэ пленки (вместо глаза) натолкнулась на препятствие — волны поглощались, еще будучи длиннее 1000 Å; линзы, образцы и даже сам воздух «непрозрачны» для такого ультрафиолета. Рентгеновские лучи с еще более короткими длинами волн способны проходить через вещество и создавать тени, но практически не фокусируются линзами. Хотя рентгеновские лучи и имеют малые длины волн и могли бы помочь проникнуть в более тонкие детали структуры, они дают лишь теньевую картину. Таким образом, барьер, созданный волновой природой света, кажется непреодолимым. Мы можем увидеть бактерии размером до 1000 Å, а вот вирусам, имеющим в десять раз меньшие размеры, суждено остаться невидимыми. Увидеть же молекулы, которые меньше вирусов в десятки раз, совсем безнадежно. А между тем вирусы, вызывающие многие болезни, привлекают пристальное внимание медиков. Существует мнение, что вирусы находятся на границе между живыми организмами и химическими молекулами. Увидев молекулы, мы смогли бы ответить на многие важнейшие вопросы химии.

Невидимость молекул доставляла много неудобств, но казалась неизбежной. В начале этого века косвенную информацию о строении молекул удалось получить с помощью рентгеновских лучей. Упорядоченные структуры атомов и молекул в кристаллах могут рассеивать рентгеновские лучи регулярным образом, напоминая того, как «растцпляется» свет, проходящий через сотканый материал (посмотрите ночью на удаленный фонарь через тонкий носовой платок или зонтик).

Картинны рассеяния рентгеновских лучей выявляют расположение атомов и расстояние между слоями в кристаллах. Они подтвердили оценку размеров молекул из измерений с помощью тонких пленок масла. В последнее время дифракционные картины позволили установить *очертания* некоторых больших молекул, т. е. не только установить детали кристаллической структуры, но и получить указания о форме молекул. Затем, пока некоторые физики сокрушались, что «нет надежды», был изобретен электронный микроскоп. В нем вместо света через исследуемый тонкий образец проходит пучок электронов, который затем фокусируется электрическими и магнитными полями, образуя на фотоэ пленке сильно увеличенное изображение. Длины электронных волн настолько меньше световых ²⁾, что позволяют различать даже «молекулы».

¹⁾ Мелкие препятствия создают небольшую рябь, но она ничего не говорит об их форме. Синеватый свет, рассеиваемый тонкой дымкой, указывает просто на присутствие очень мелких частиц и ничего не говорит об их форме — круглые они, заостренные или продолговатые. Голубой цвет неба — это солнечный свет, рассеянный молекулами воздуха.

²⁾ Ускоренные в электронном микроскопе электроны ведут себя так, как будто тоже имеют длину волны, но гораздо меньшую, нежели длина волны света. Так что они открывают новую возможность «увидеть» независимо от того, рассматриваете ли вы их как частицы, размеры которых гораздо меньше атомов, или как сверхкороткие волны. Возникла целая отрасль — электронная оптика — с ее линзами для электронных микроскопов и телевизионных трубок (представляющих собой своего рода «проекторный фонарь» для электронов).

Поэтому теперь мы можем «рассматривать» вирусы с огромным увеличением и даже удастся сфотографировать большие молекулы. Полученные контуры молекул хорошо согласуются с теми умозрительными картинками, которые рисовали химики, исходя из хитроумных рассуждений о химических свойствах этих молекул.

В последнее время созданы еще более «тонкие» методы. В конце нашей книги мы приводим фотографию отдельных атомов металла на острие булавочной головки. Почему мы не показываем ее сейчас? Да потому, что прежде необходимо познакомиться с атомной физикой, ее методами и подходами. Тогда вы поймете, насколько правильна эта фотография. Мы будем говорить об электронах сверхвысоких энергий, которыми сейчас прощупывают структуру атомных ядер, исследуя их теневое изображение.

За последние 100 лет молекулы из мельчайших гипотетических кирпичиков теории превратились в такую реальность, что мы пытаемся даже разглядеть их форму. Большинство характеристик молекул — скорость, их число, масса, размер — были получены еще в прошлом веке на основе кинетической теории газов. *Теория порождала измерения, и измерения подтверждали теорию.* А теперь мы оставим заботу о том, как увидеть молекулы, и посмотрим, что можно получить из простых экспериментов.

Измерение скорости молекул

Вернемся к нашему результату:

$$\text{ДАВЛЕНИЕ} \cdot \text{ОБЪЕМ} = \frac{1}{3} N \cdot m \cdot \overline{v^2}.$$

Если верить этому выражению, то можно оценить реальную скорость молекул. Ведь N — это число молекул, а m — масса одной молекулы, так что Nm — *общая масса молекул газа в сосуде*. Следовательно, выражение переписывается в виде

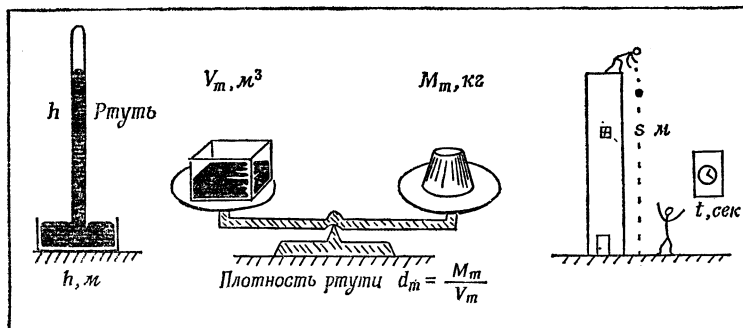
$$\text{ДАВЛЕНИЕ} \cdot \text{ОБЪЕМ} = \frac{1}{3} M \cdot \overline{v^2},$$

где M — общая масса молекул газа. Мы можем взвесить образец газа, измерить его объем при известном давлении, подставить результаты наших измерений в написанное выше соотношение и найти величину $\overline{v^2}$ — среднее значение квадрата скорости.

Опыт 1. Необходимые измерения показаны на фиг. 9. Мы измеряем давление обычного комнатного воздуха ртутным барометром. (Высота столбика, плотность ртути и величина ускорения силы тяжести,

$g = 9,8$ ньютон/кг, дадут давление в абсолютных единицах, ньютон/м² ¹⁾.) Взвесим воздух, который заполняет колбу. Для этого взвесим колбу, заполненную воздухом при атмосферном давлении, а затем, после того

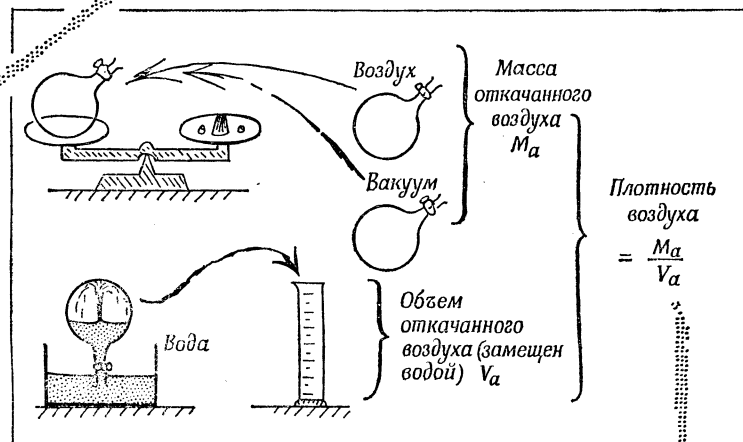
¹⁾ Поскольку кинетическая теория построена на втором законе Ньютона, то сила должна выражаться в абсолютных единицах, ньютонах, а давление — в ньютонах на квадратный метр.



Давление атмосферы = (высота барометра) · (плотность ртути) · (сила поля g)

$$P = h \cdot d \cdot g \text{ (метры) } \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right) \left(\frac{\text{ньютон}}{\text{кг}} \right)$$

$$= h \cdot d \cdot g \text{ ньютон/м}^2$$



Согласно кинетической теории

$$p = \frac{1}{3} \frac{Nm\bar{v}^2}{V} = \frac{1}{3} \frac{Nm}{V} \cdot \bar{v}^2 = \frac{1}{3} \frac{\text{Масса}}{\text{Объем}} \cdot \bar{v}^2 = \frac{1}{3} \text{ плотность} \cdot \bar{v}^2$$

$$\text{Средняя (скорость}^2), \bar{v}^2 = 3 \frac{\text{давление}}{\text{плотность}}$$

Фиг. 9. Косвенное измерение скорости молекул на основе кинетической теории газов.

как весь или почти весь воздух выкачан из колбы, погрузим колбу в воду, откроем пробку, чтобы вода заменила воздух. Измерение объема воды в колбе даст нам объем воздуха известной массы. Подставив эти результаты, вычислим $\bar{v}^2$, а следова-

тельно, и квадратный корень из него $\sqrt{\bar{v}^2}$, который можно назвать *средней скоростью* (точнее, *средней квадратичной скоростью*).

В задаче 4 приведены результаты этих измерений. Вычислите скорость.

Задача 4. Скорость молекул кислорода

Опыт показывает, что 32 кг кислорода при атмосферном давлении и комнатной температуре занимают объем 24 м³.

- а) Вычислите плотность кислорода, т. е. (масса)/(объем).*
- б) Используя соотношение кинетической теории газов, вычислите средний квадрат скорости молекул $\bar{v}^2$.*
- в) Извлеките корень и найдите среднюю квадратичную скорость в м/сек.*

Молекулы воздуха носятся со скоростью 400 м/сек! Итак, теория дает полезные предсказания и подтверждает свои предположения, как ей и пристало! Мы предположили, что газ состоит из молекул, которые, по-видимому, движутся быстро, и наша теория на основе простых измерений показывает, сколь быстро они движутся. Но теория не может доказать правильность собственных предсказаний. Результат может подтверждать лишь правильность предположений теории. Так что нужна экспериментальная проверка. Если теория пройдет одно или два испытания, мы вполне можем положиться на ее дальнейшие предсказания.

Скорость молекул; экспериментальные данные

Грубые указания о величине скорости мы можем получить, изучая скорость звука и броуновское движение.

Задача 5. Скорость звука

Мы считаем, что звук переносится волнами сжатия и разрежения, причем изменение плотности и движение передаются от одной молекулы к другой благодаря соударениям. Если воздух действительно состоит из движущихся молекул, то что вы можете сказать об их скорости, зная, что измерения скорости звука в воздухе дают величину 340 м/сек?

Задача 6. Броуновское движение

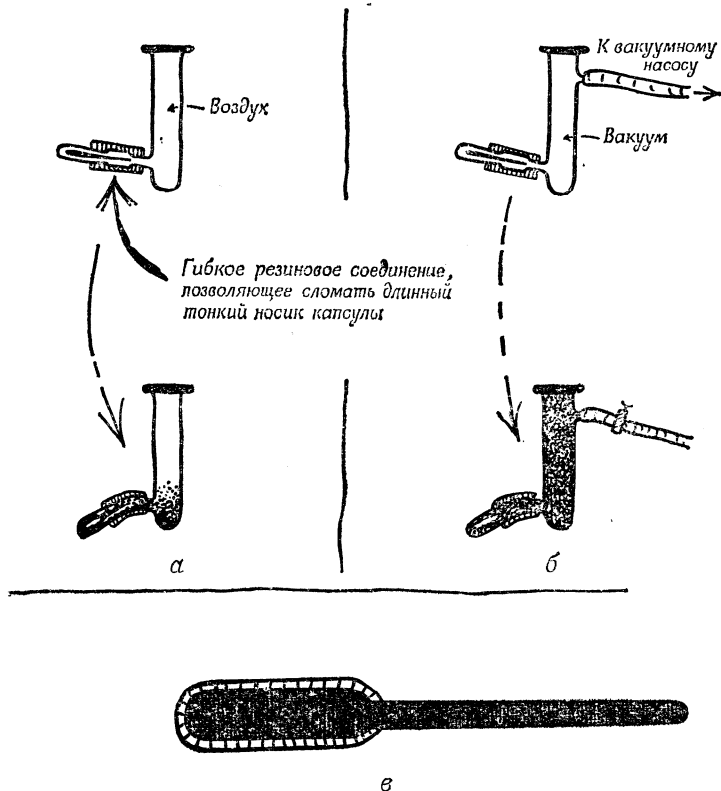
Поглядев в микроскоп на дым, вы увидите быструю пляску больших частиц пепла и бешеную — маленьких.

- а) Частицы могут быть настолько малы, что их не видно. Каково их движение?*
- б) Считая молекулы еще меньшими частицами пепла, что можно сказать об их движении?*

Обе задачи просто имеют общее решение. А вот опыт, который показывает, насколько быстро движутся молекулы газа.

Опыт 2. На дно тонкой стеклянной пробирки выпускается жидкий бром ¹⁾. Жидкость немедленно испа-

воздух. Теперь освобожденные пары брома движутся очень быстро. (Молекулы брома движутся столь же



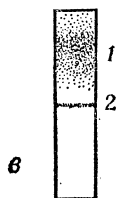
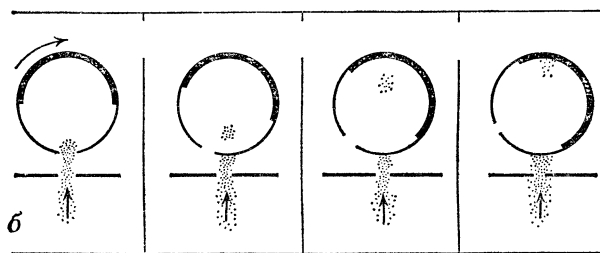
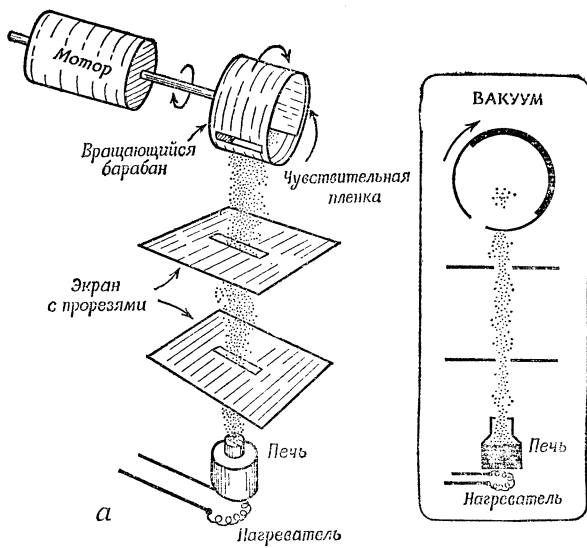
Фиг. 10. Движение молекул брома.

а — диффузия брома в воздухе; б — бром, выпущенный в вакуум; в — капсула.

рывается, и бурый пар, или «газ», медленно распространяется по трубке. Затем тот же эксперимент повторяется с пробиркой, из которой выкачан

быстро и в воздухе, но распространение газа замедляется множеством столкновений с молекулами воздуха.)

¹⁾ Жидкий бром вносится в пробирку в маленькой стеклянной капсуле с длинным носиком, который легко обламывается.



Фиг. 11. Прямое измерение скоростей молекул.

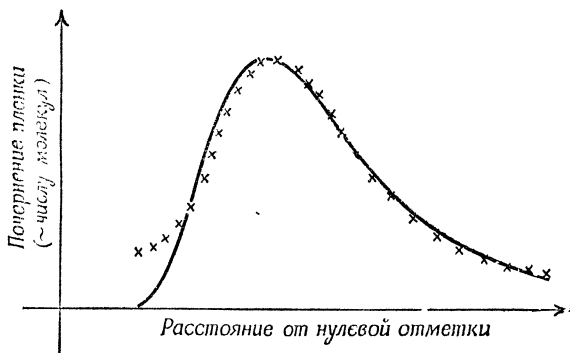
а — схема опыта Цартмана; б — различные стадии вращения барабана; в — развернутый образец пленки.
1 — метки от молекул различных скоростей; 2 — нулевая метка, сделанная молекулами при неподвижном барабане.

Прямые измерения

Настоящей проверкой должны служить прямые измерения. Скорость молекул измерялась несколькими экспериментаторами. Мы рассмотрим типичный эксперимент, сделанный Цартманом.

Опыт 3. Пучок молекул пропущен через прорезь в цилиндрическом барабане, который мог быстро вращаться. Это были молекулы висмута, которые испарялись в вакууме из жидкого расплава в маленькой печи. Затем серия экранов с прорезями выделяла узкий пучок, который попадал в барабан. При каждом повороте щель барабана пропускала

сдвигу метки, диаметру барабана и скорости его вращения вычислялась скорость молекул. Когда пленка извлечена из барабана, то на ней оказалась резкая центральная метка из осевшего металла, а метка, возникшая при вращении, имела вид размазанного пятна, которое говорило, что скорости молекул не были одинаковыми, а были разбросаны в



Фиг. 12. Результаты опыта Цартмана.

Кривая характеризует плотность почернения (экспериментальные результаты). Крестиками показаны значения, предсказываемые кинетической теорией газов на основе статистики.

только небольшую порцию движущихся молекул. Когда барабан покоился, молекулы пролетали к противоположной стенке барабана и создавали отметку на пленке, расположенной за щелью. При вращении барабана пленка за время пролета молекул через барабан перемещалась на заметное расстояние и метка сдвигалась в новое положение. По этому

довольно широкой области. Молекулы газа движутся хаотически, испытывая столкновения, и следует ожидать, что в любой момент имеется довольно разнообразный набор скоростей. В предсказаниях же кинетической теории фигурирует *средняя*, точнее, *средняя квадратичная* скорость $\sqrt{\overline{v^2}}$. Распределение скоростей относительно средней можно

предсказать с помощью математической статистики случайных событий. В опыте Цартмана пучок горячих молекул пара будет обладать тем же распределением скоростей с пиком при величине, характеризующей тем-

пературой. Измерения потемнения пленки дали в точности такое же распределение и среднюю величину, очень хорошо согласующуюся с предсказанной простейшей теорией (фиг. 12) ¹⁾.

Скорости молекул в других случаях. Диффузия

Звешивание бутылки водорода или гелия при атмосферном давлении и комнатной температуре показывает, что эти газы менее плотны, чем воздух; углекислый газ более плотен. Поэтому, согласно нашему предсказанию, $pV = \frac{1}{3}M\bar{v}^2$, молекулы водорода и гелия движутся быстрее молекул воздуха (при той же температуре), а молекулы углекислого газа — медленнее. Вот что получается на самом деле.

Газ	Измерения при комнатной температуре и атмосферном давлении	
	объем, м ³	масса, кг
Водород	24	2,0
Гелий	24	4,0
Углекислый газ	24	44,0
Кислород	24	32,0
Азот	24	28,0
Воздух ($\frac{1}{5}$ кислорода + $\frac{4}{5}$ азота)	24	28,8

Задача 7. Скорости

- Если молекулы кислорода при комнатной температуре движутся со скоростью около 400 м/сек, то с какой скоростью движутся молекулы водорода?
- Какова средняя скорость молекул гелия по сравнению с молекулами водорода при той же температуре? (Найдите отношение «средних» скоростей.)
- Какова скорость молекул углекислого газа по сравнению с молекулами воздуха при той же температуре? (Найдите отношение «средних» скоростей.)

¹⁾ Простейшим прототипом опыта Цартмана является схема, показанная на фиг. 202 гл. 8 (т. 1, стр. 322) для измерения скорости ружейной пули.

Задача 8

Рискните угадать¹⁾, будет ли скорость звука в гелии той же, что и в воздухе. А может быть больше или меньше?

Проверьте вашу догадку, наполнив органную трубу сначала воздухом, а затем гелием (или углекислым газом), или же вдыхните гелий, а затем попробуйте сказать что-нибудь. (Рот и нос работают как миниатюрная органная труба.) Изменение скорости звука изменяет время, необходимое для прохождения звука от одной стенки трубы до другой, и изменяет таким образом частоту колебаний звука, повышая частоту основного тона.

Задача 9

Как, по вашему мнению, изменится скорость звука в воздухе при изменении давления и постоянной температуре? (Ответьте на этот вопрос, учитывая, что 28,8 кг воздуха при комнатной температуре и давлении 1 атм занимают 24 м³, а при давлении 2 атм — 12 м³.)

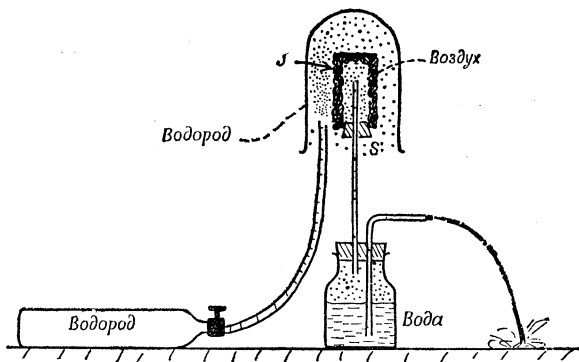
Диффузия

Если скорости молекул разных газов столь отличны, то при прохождении через длинную тонкую трубку один газ должен отделяться от другого. Для этого трубочки должны быть настолько длинными и узкими, чтобы молекулы газа просачивались через них поодиночке.

Опыт 4. Подходящими порами обладает, например, неглазурованная керамика (фиг. 13 и 14). Именно такими порами пропизана белая керамическая кружка *J*. Если наполнить ее сжатым газом и закрыть пробкой *S*, то, как и следовало ожидать, газ через поры постепенно вытечет из кружки в атмосферу. Но если внутри и снаружи давление одинаково (атмосферное), то трудно ожи-

дать утечки, даже если внутри и снаружи были разные газы. Однако изменения происходят, указывая на разные скорости молекул. Описанный опыт начинается с того, что внутри кружки находится воздух, а вне ее — другой газ, также при атмосферном давлении. Молекулы водорода проникают в кружку быстрее, чем оттуда выходит воздух, или же воздух выходит быстрее, чем «вползают» молеку-

¹⁾ Это действительно рискованно, так как мы не рассматривали механизма передачи звука. Здесь и в самом деле встречается одно неожиданное обстоятельство, которое у гелия будет иным, — это легкость нагревания газа при распространении в нем звуковых волн сжатия. Мгновенное повышение температуры заставляет звуковые волны распространяться еще быстрее. В гелии этот эффект более заметен, чем в воздухе, и приводит к скорости звука, на 8% большей, чем при простом сравнении с воздухом. Однако кинетическая теория газов может предсказать это влияние удельной теплоемкости: гелий должен обладать меньшей теплоемкостью.

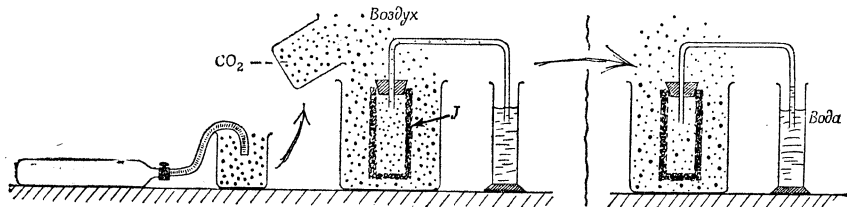


Фиг. 13. Диффузия газов.

Водород диффундирует внутрь сосуда сквозь пористую стенку *J* быстрее, чем воздух из него.

лы CO_2 . Это качественная демонстрация диффузии, но она подсказывает способ разделения смеси газов. Поме-

воздух или вакуум, будет диффундировать быстрее, чем CO_2 , так что, повторяя этот процесс несколько раз,



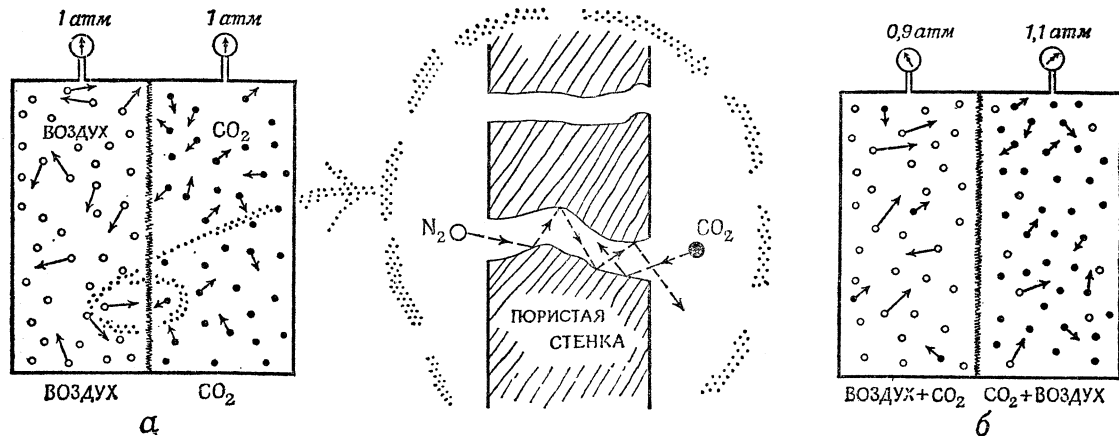
Фиг. 14. Диффузия газов.

Углекислый газ диффундирует внутрь сосуда через пористую стенку *J* медленнее, чем воздух из него.

стите внутрь кружки смесь водорода и CO_2 . Тогда водород независимо от того, что находится вне кружки —

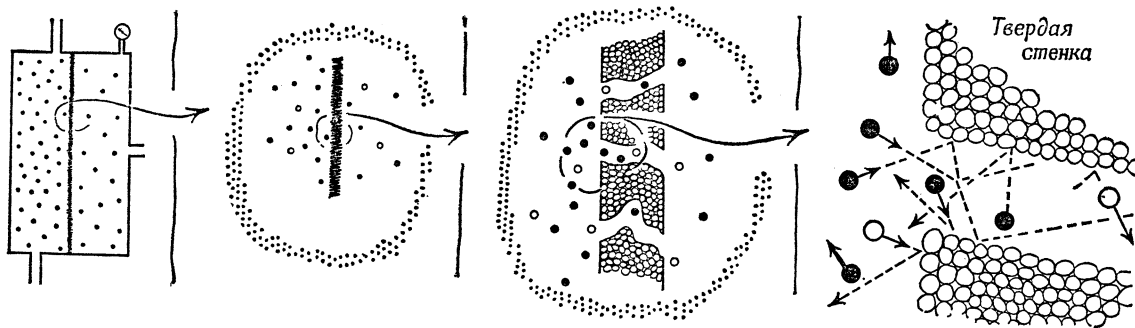
можно получить почти чистый водород.

В этом и состоит *физический* метод разделения, основанный на различии молекулярных скоростей, которое обусловлено различием масс молекул (фиг. 15). Здесь не требуется различия *химических* свойств, и им можно пользоваться для разделения «изотопов» — близнецов, которые совершенно идентичны химически, но немного отличаются атомным весом. Когда впервые были открыты изотопы — один образец газообразного неона оказался на 10%

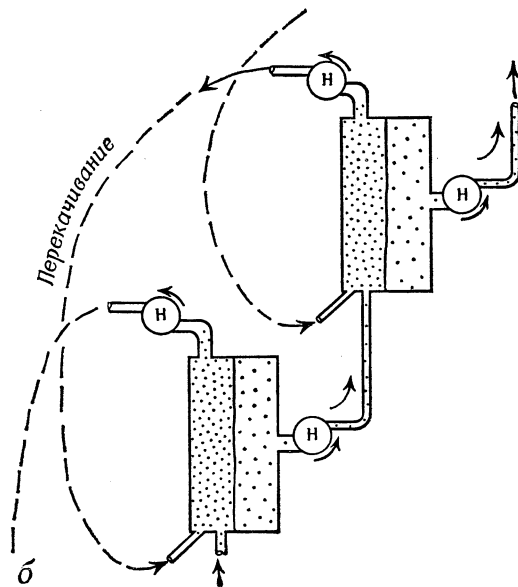
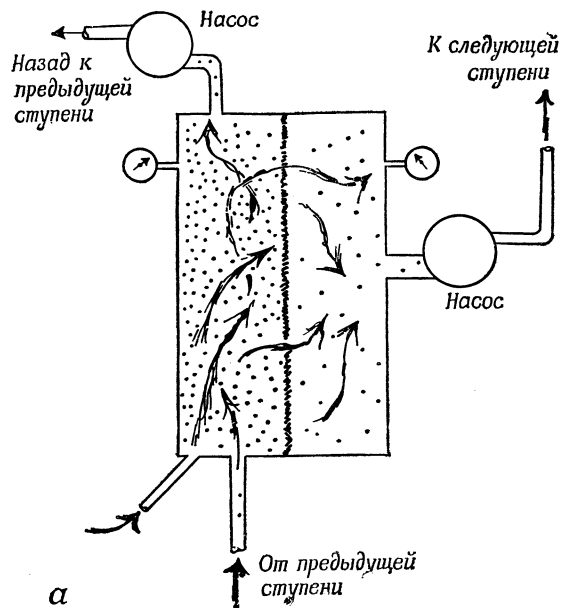


Фиг. 15. Диффузия газов.

Воздух и углекислый газ при атмосферном давлении разделяются пористой перегородкой. Сначала они занимали равные объемы при одинаковом давлении и содержали одинаковое число молекул. (а). Но молекулы воздуха в среднем проходят по порам быстрее, чем молекулы CO_2 . Поэтому число молекул и давление становятся неодинаковыми (б).



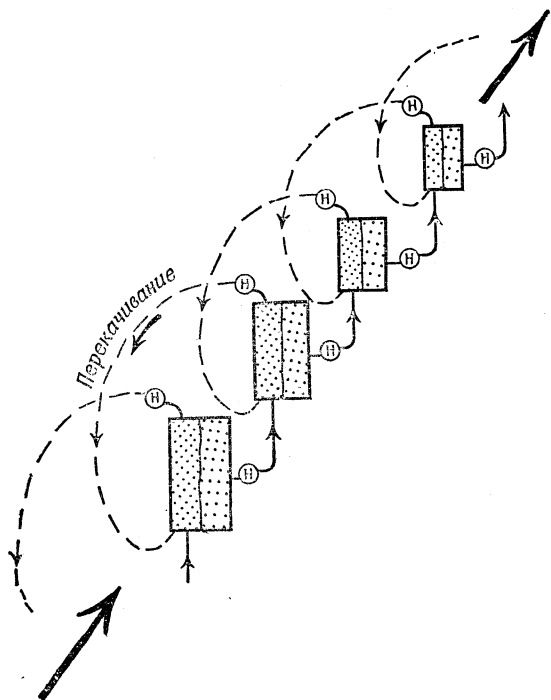
Фиг. 16. Разделение изотопов урана с помощью диффузии UF_6 через пористую перегородку. Молекулы газа, много раз соударяясь с перегородкой и стенками пор, частично проникают сквозь них.



Фиг. 17. Разделение изотопов урана с помощью диффузии UF_6 через пористую перегородку (а) и многоступенчатое разделение диффузией (б).

Смесь, прошедшая первую ступень, перекачивается на вход второй ступени. Неиспользованная смесь перекачивается назад на вход предыдущей ступени.

плотнее другого, а одни атомы свинца тяжелее других,— это казалось любопытным курьезом. Разделение имело смысл с точки зрения демонстрации эффекта. Диффузия естественной смеси неона в атмосфере давала такую возможность. Но после того как стало



Фиг. 18. Разделение изотопов урана с помощью диффузии.

Чтобы добиться почти полного отделения $U^{235}F_6$, необходимы тысячи ступеней.

известно, что в природном уране перемешаны два изотопа, один из которых легко расщепляется, а другой нет, выделение редкого изотопа стало вопросом первостепенной важности. Сейчас для этого в огромных масштабах используют диффузию газов (см. задачу 11 и фиг.16—18; см. также гл. 30 и 43 ¹⁾).

¹⁾ Гл. 43 («Физика атомного ядра») входит в т. 3 настоящего издания.

Температура

Нагревание газа увеличивает p или V . С увеличением температуры всегда возрастает pV , а поэтому и $\frac{1}{3}Nmv^2$. Следовательно, нагревание газа увеличивает v^2 и заставляет молекулы двигаться быстрее. В этом суть эффекта повышения температуры.

Задача 10

- а) Как по-вашему, при повышении температуры воздуха скорость звука станет больше, меньше или останется той же самой? Объясните.
б) Как вы думаете, при повышении температуры диффузия газов происходит быстрее, медленнее или с той же скоростью? Объясните.

Развитие кинетической теории газов

Мы не в силах дать точных ответов на подобные вопросы, пока не изучим подробнее теплоту, температуру и энергию. Затем мы сможем извлечь новые данные о внутреннем трении в газе, теплопроводности и найдем способ измерения массы отдельной молекулы, так что сможем сосчитать мириады молекул в объеме газа. Мы вернемся к кинетической теории газов после изучения энергии. Именно кинетическая теория газов приводит нас к понятию энергии.

Что такое mv^2 ?

Выражение $\frac{1}{3} Nmv^2$ очень важно с точки зрения изучения газов. Оно означает (забудем на время множитель $\frac{1}{3}$):

число молекул газа $\cdot (mv^2 \text{ одной молекулы})$.

Что же такое mv^2 для движущейся молекулы? Конечно, это масса, умноженная на квадрат скорости, но какого рода величину она характеризует? Каковы ее свойства? Уж не является ли она одним из членов ряда $m \dots mv \dots mv^2 \dots$? Масса m нам знакома. Она считается постоянной, а ее полное значение — сохраняющейся величиной. Знаком нам и mv — импульс. Он рассматривался как вектор, который также сохраняется. В такой ли степени полезна величина mv^2 ? Строение ее таково:

$$mv \cdot v = Ft \cdot v,$$

или

$$\text{СИЛА} \cdot \text{ВРЕМЯ} \cdot \frac{\text{РАССТОЯНИЕ}}{\text{ВРЕМЯ}},$$

так что mv^2 имеет вид (сила) · (расстояние). Полезно ли это произведение? Чтобы сила действовала на некотором расстоянии, необходим двигатель, потребляющий топливо. Топливо... энергия. Мы увидим, что для появившегося в теории газов выражения mv^2 необходим только множитель $1/2$, чтобы превратить его в «энергию».

Задача 11. Разделение урана (вариант см. гл. 30, задача 3)

Молекула кислорода содержит два атома, и мы обозначаем ее O_2 ; молекула водорода также состоит из двух атомов H_2 , а газообразный фторид урана имеет формулу UF_6 .

Химические опыты показывают, что относительные массы атомов O, H, F и U равны 16, 1, 19, 238. Доказательства и блестящая догадка Авогадро приводят к заключению, что стандартный объем любого газа при 1 атм и комнатной температуре содержит одно и то же число молекул независимо от сорта газа (одно и то же для O_2 , H_2 и UF_6). Кинетическая теория газов подтверждает эту догадку (см. гл. 30).

- Обратившись вновь к задаче 7, вы увидите, что замена O_2 на H_2 меняет массу молекулы в отношении 32 : 2. Каково изменение при той же температуре у $\overline{v^2}$, т. е. у средней квадратичной скорости? (Во сколько раз молекулы водорода при комнатной температуре движутся быстрее молекул кислорода? Напишите соотношение между новой скоростью и старой. Здесь вам не нужно повторять всю арифметику; просто проследите за изменяющимся множителем.)
- Сделайте то же самое, заменив кислород газообразным фторидом урана. Сделайте грубый арифметический расчет и найдите приближенное числовое значение.
- Существует несколько сортов атомов урана. Масса обычного урана равна 238 (по сравнению с 16 для кислорода), но редкий изотоп (0,7% в смеси, полученной из руды), тот самый, который легко делится, имеет массу 235. Один из способов (очень медленных) отделения этого редкого изотопа урана от обычного состоит в превращении смеси во фторид и диффузии газообразного фторида через пористую стенку. Поскольку молекулы фторида U^{235} имеют несколько иную скорость, то после диффузии получится смесь с иными пропорциями.

1) Обогащается ли она или обедняется U^{235} ?

2) Обоснуйте ваш ответ на предыдущий вопрос.

3) Оцените разницу в % средних скоростей молекул $[U^{235}F_6]$ и $[U^{238}F_6]$. (Примечание. Как уже обсуждалось в гл. 11 (т. 1), изменение на $x\%$ в некоторой величине Q приводит к изменению $1/2x\%$ для величины $\sqrt{Q}$.)

Задача 12

На фиг. 13 и 14 показаны два примера диффузии. Опишите, что там происходит, и объясните эксперимент.

Задача 13. Сжатие газа с молекулярной точки зрения

- Когда упругий шарик испытывает лобовое соударение с массивной стенкой, он отражается с первоначальной скоростью. То же происходит и с мячом, ударяющимся о массивную битую, которая удерживается на месте. Однако

если бита движется в направлении к мячу, то он отлетит с другой скоростью. Как он будет двигаться — быстрее или медленнее?

- б) (Вопрос трудный. Нужно хорошо подумать.) Что произойдет со временем упругого соударения, когда бита движется по направлению к мячу? Будет ли оно длиннее, короче или тем же самым, что и в случае неподвижной биты?
- в) Если газ в цилиндре сжимается поршнем, его температура возрастает. Как это явление объясняется с точки зрения кинетической теории газов?
- г) Предположим, что сжатый газ расширяется и толкает поршень. Что произойдет с газом?

Задача 14. Размер молекул и их пробег

Пусть закрытый сосуд содержит большое число молекул газа при фиксированной температуре. Предположим, что по приказу волшебника молекулы раздулись и стали больше, хотя их число, скорости и объем сосуда не изменились.

- а) Как это повлияет на среднее расстояние от центра до центра молекул (сильно увеличится, уменьшится или изменится немного)?
- б) Объясните ваш ответ.
- в) Как это повлияет на среднее расстояние, проходимое молекулами между двумя соударениями (средняя длина свободного пробега)?
- г) Объясните ваш ответ.

«Любовь всем движет в этом мире».

Старинная песенка

«Энергия, ты заставляешь мир крутиться.

Энергия, ты объясняешь все вокруг».

Современная песенка

Энергия и топливо

Проще всего сказать, что энергия объясняет все в физике, химии,..., возможно, в биологии. Практически такое утверждение бессмысленно, а в некоторых случаях явно неверно. Чтобы правильно и успешно применять понятие энергии, необходимо знать, как оно возникло, и понимать, что же это такое. Только тогда вы сможете пользоваться понятием энергии как мощным оружием научного мышления.

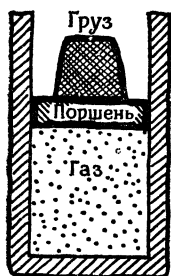
Мы постараемся в этом курсе избегать говорить об энергии, пока не обсудим, что это такое, с нескольких сторон. Начнем сперва с житейского и довольно примитивного описания энергии как вещи, за которую нам приходится платить, как за *топливо*. Постепенно по мере уточнения смысл способа измерения и полезность понятия энергии будут становиться все более ясными.

Основа нашей цивилизации — топливо. Без топлива немыслима никакая общественная жизнь, по сути дела невозможна вообще жизнь, если пищу считать тоже топливом. Уголь для паровых машин, бензин для моторов, овес для лошадей, пища для людей — за все надо платить. Топливо необходимо нам для выполнения многих работ, и количество закупаемого топлива должно быть пропорционально количеству требуемой работы. Современный человек, который говорит: «Зачем мне топливо, у меня дома есть электричество», — тоже платит за топливо. Он платит за пользование электричеством, а для электростанции покупается уголь. Правда, для обогрева домов мы можем использовать солнечное тепло, а для вращения генераторов — силу падающей воды. Это «даровое» топливо. Но здесь есть вполне определенный предел. Солнце, нагревающее комнату, или речной поток снабжают нас

определенным количеством «бесплатного» топлива, как богатые родители карманными деньгами. Мы можем получить определенную работу, но, как и карманные деньги, ее нельзя увеличивать беспредельно. В большинстве случаев мы косвенно пользуемся ядерным топливом Солнца. Река работает на солнечной энергии наших дней благодаря испарению и ветрам, а уголь вырос под солнечными лучами древних времен. Поэтому денежная цена — неподходящая для нас мера топлива, ибо она колеблется от бесплатного солнечного света и дешевых дров до нефти и угля, которые дороги, особенно вдали от источников сырья. Вместо этого мы подойдем к понятию *энергии*, получаемой из *топлива*, с другой стороны, с точки зрения того, куда это топливо идет. Многие виды работ требуют затраты топлива. Изучая их, мы видим, что количество топлива, необходимого для таких работ, пропорционально количеству работы. Рассмотрим, например, поднятие груза на гору или на крышу здания. Для этого необходимо топливо. Сколько бы его ни требовалось, две однотипные работы по поднятию груза потребуют уже вдвое большего количества топлива — вдвое больше кусков угля или вдвое больше литров нефти, или работы за то же время двух водяных колес вместо одного, или вдвое большего количества солнечного света. Догадываетесь, в чем дело? *Количество топлива пропорционально работе.*

Мы говорим, что энергия есть нечто, необходимое для совершения определенного количества работы и получаемое из топлива, а топливо — это источник полезной энергии. Но не всякое дело и не каждая машина требуют затраты топлива. Для каких же работ оно все-таки необходимо? Нужно ли нам топливо, чтобы создать или поддерживать большое усилие или быстрое движение? Для работы винта не требуется больших затрат топлива. Можно создавать огромную силу практически без затраты топлива и уж, конечно, без пропорциональности его расхода величине силы или времени ее действия. Достаточно небольшого поворота винта струбцины или тисков, и они могут неопределенно долго поддерживать силу без всякого снабжения топливом. Груз, лежащий на подпорке, создает «бесплатную» силу до тех пор, пока остается на ней. Тяжелый поршень, сжимающий газ в цилиндре, неопределенно долго может поддерживать высокое давление, не требуя «платы» за это. Не требует топлива и равномерное движение. Оно продолжается само по себе (первый закон Ньютона). Планеты и молекулы газа остаются в движении без затраты топлива. Так для каких же дел топливо все-таки *необходимо* и притом *пропорционально работе*? Давайте перечислим некоторые из них, известные нам из жизненного опыта.

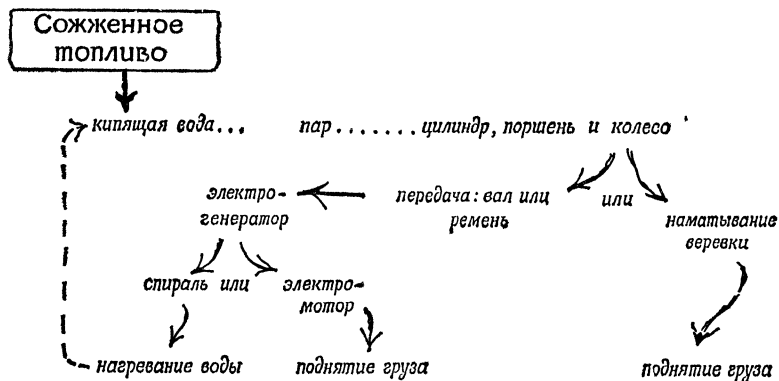
а) *Поднятие груза.* Уже первые строители обнаружили, что для этого требуется топливо — пища для рабов, зерно для лошадей, падающая вода для водяных колес. Груз не поднимается сам. Даже



Фиг. 19.

если его толкнуть, он не будет продолжать подниматься сам по себе, а замедлится до полной остановки.

б) *Движение тележки по шероховатой дороге.* Чтобы поддерживать движение тележки, необходимо топливо. Конечно, если тележка не движется, то тянуть ее можно и без всякого топлива. В этом



Фиг. 20. Превращение энергии.

случае вместо живого человека мы можем поставить статую, наклонив ее так, чтобы она вечно тянула тележку без какой-либо затраты топлива. Но если тележка поедет, то наша статуя упадет и окажется бесполезной. Для поддержания движения тележки по шероховатой дороге нужен либо живой человек, либо паровая машина, сжигающая уголь, либо электромотор, который постоянно требует электроэнергию.

в) *Завод часовой пружины.* Чтобы завести часовую пружину, нам приходится крутить ключ. Для растяжения или сжатия любой простой пружины необходимо движение руки или какого-нибудь другого механизма, потребляющего топливо. Заведенная пружина может поднимать груз или двигать тележку до тех пор, пока не раскрутится. (Подобную же работу может производить и сжатая или растянутая пружина, если ее отпустить.) По-видимому, деформированная пружина обладает способностью запаса́ть работу — в ней можно «накапливать» топливо.

г) *Ускорение какого-либо тела.*

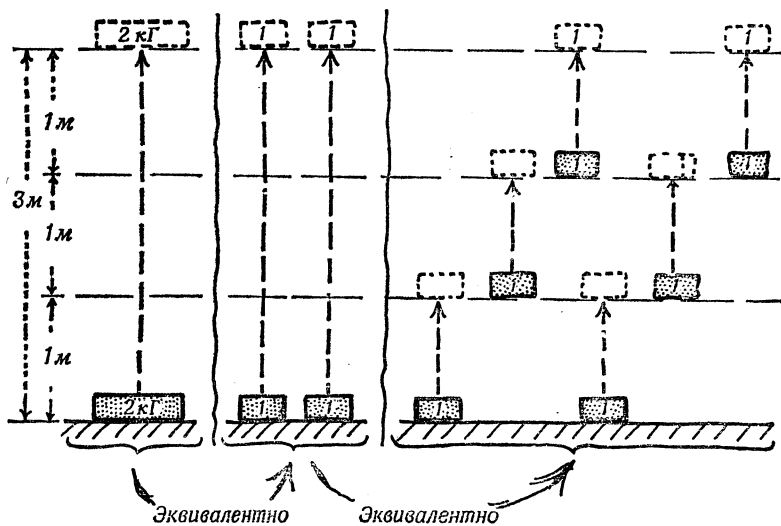
д) *Нагревание бака с водой.* Для этого, несомненно, нужно топливо, причем пропорционально не только повышению температуры, но и нагреваемой массе. Нетрудно придумать и другие примеры. Фиг. 20 заставляет нас еще подумать о взаимном *превращении* энергии из одной формы в другую.

«Работа» и измерение энергии

Любой пример с поднятием груза, растяжением пружины или движением тележки по шероховатой дороге требует приложения *силы, которая движется вместе с телом*. Мы тянем груз вверх вдоль направления его движения, оттягиваем конец пружины вдоль направления ее растяжения. Можно ли в случае этих работ построить общую схему учета топлива — схему «измерения энергии», как мы будем именовать ее в дальнейшем?

Возьмем, к примеру, расход топлива при поднятии груза на стройке или в шахте — древнейшие механические примеры, где необходимость в топливе очевидна. Предположим, нам нужно поднять 2 кг по вертикали на высоту 3 м . Возьмем сначала груз 1 кг и поднимем его на высоту 1 м . Для этого нам потребуется некоторое количество топлива. Здравый смысл говорит, что если такое количество топлива требуется для поднятия 1 кг на 1 м , то и для следующего метра потребуется то же самое количество, а потом для следующего снова то же количество и т. д. Всего поднятие 1 кг на 3 м потребует тройного количества топлива. Возьмем теперь груз потяжелее — 2 кг . Поднятие двойного груза подобно поднятию двух грузов порознь. Здравый смысл и непосредственная проверка говорят нам, что расход топлива складывается: работа по поднятию может быть разбита на отдельные стадии. Поэтому, чтобы найти плату за поднятие 2 кг на высоту 3 м , мы разлагаем работу на две части — поднятие 1 кг на 3 м , а каждую из этих частей делим на три самостоятельных этапа: каждый есть поднятие 1 кг

на 1 м. Мы говорим, что поднятие 2 кг на 3 м потребует вдвое большего количества топлива, нежели поднятие 1 кг, и в 3 раза большего, нежели поднятие на 1 м, так что всего топлива потребуется в



Фиг. 21. Разложение работы по поднятию груза на этапы.

2×3 , или в 6 раз больше, чем для поднятия 1 кг на 1 м. Таким образом, потребуется 6 кгм (килограммометров); 1 кгм означает

$$1 \text{ кг (СИЛА)} \times 1 \text{ м (РАССТОЯНИЕ)}.$$

Представьте себе, что вся работа производится бригадой одинаковых демонов, каждый из которых переносит 1 кг с одной ступеньки на другую, находящуюся на 1 м выше, а второй — с этой ступеньки на следующую, при этом каждый съедает стандартный кусочек пищи. Хотя здравый смысл и говорит нам, что подобное разделение труда вполне допустимо и что расход топлива складывается, но окончательно подтвердить это может только поднятие груза во всевозможных условиях. И опыт действительно подтверждает это.

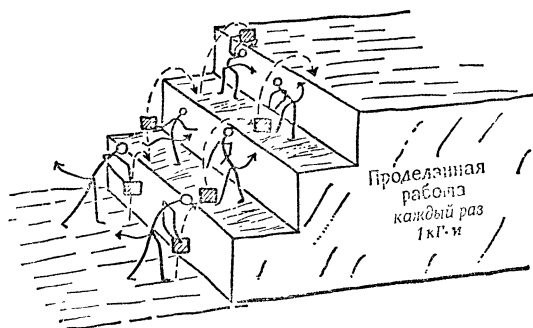
Следовательно, полный расход топлива при поднятии груза можно измерять произведением

$$\text{ВЕС} \cdot \text{ВЫСОТА}.$$

А это не что иное, как

$$\text{СИЛА} \cdot \text{РАССТОЯНИЕ}.$$

Но применима ли эта мера к другим машинам, превращающим топливо в работу? Если к такой машине присоединить веревку, то мы можем заставить веревку либо поднимать груз, либо тащить



Фиг. 22. Работа.

Каждый человек производит единичную работу.

тележку, либо растягивать пружину. Предположим теперь, что машина не знает или ей «все равно», что происходит на другом конце веревки, тогда естественно ожидать, что при одинаковой силе тяги и отрезке вытянутой веревки будет израсходовано одно и то же количество топлива. Таким образом, мера использованного топлива

ВЕС · ВЫСОТА

обобщается теперь на произведение

СИЛА · РАССТОЯНИЕ.

Способность, которой обладает топливо в скрытой форме и которую оно посредством машины передает поднятому грузу, мы называем *энергией*. Поднятый груз также обладает такой скрытой способностью, позволяющей ему при падении поднять другой груз. В этом отношении энергия напоминает деньги, которые могут существовать во множестве различных форм (лежать в банке или идти в дело) и множеством различных способов могут переводиться туда и сюда. Однако произведение

СИЛА · РАССТОЯНИЕ

мы называем не энергией, а «работой» и рассматриваем его как «свидетельство» *передачи энергии* ¹⁾.

Подчеркнем две особенности употребления слова «работа».

1) Смысл его гораздо уже того слова, которое мы повседневно употребляем, когда говорим о разработке какой-либо проблемы или о том, насколько трудно держать на вытянутой руке тяжелый груз, хотя в обыденной жизни слово «работа» употребляется также и в научном смысле, когда мы говорим о работе при *поднятии* груза. Здесь сказывается неудачный выбор обиходного слова в качестве определенного научного термина. Будь мы умнее, мы бы придумали для произведения *силы на расстояние* другое название, подобно тому как древние химики изобрели слово «газ». (Требуется ли размышление над математическими задачами дополнительных затрат топлива-пищи и почему утомительно держать в руке тяжелый груз — вопросы психологические, и мы коснемся их позднее.)

2) Умножая *силу на расстояние*, необходимо брать *расстояние, пройденное в направлении действия силы* (или произведение *пройденного расстояния на составляющую силы в направлении движения*, что количественно дает то же самое ²⁾).

¹⁾ Некоторые учебники рассматривают работу как форму энергии и различают работу, произведенную *над* пружиной, и работу, произведенную *самой* пружиной. Однако, по-видимому, правильнее рассматривать работу, т. е. произведение (*сила*) · (*расстояние*), как показатель того, сколько энергии перешло *из одной формы* в другую или с одного места на другое. Работа при этом может быть положительной и отрицательной. Она показывает потерю энергии одним агентом и приобретение ее другим. Здесь мы не приписываем работе знаков + или —. У нас она просто показывает потерю энергии одной частью и приобретение ее другой.

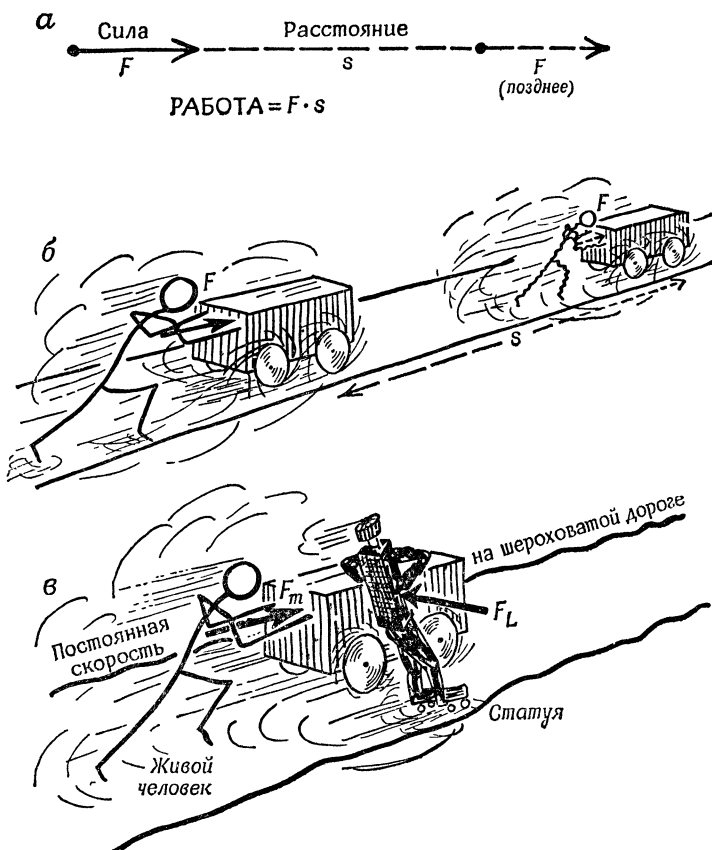
²⁾ Существует, однако, совершенно другой вид произведения *силы на расстояние*, когда *сила и расстояние* направлены под *прямым углом друг к другу*. Эта величина измеряет «момент силы», или «пару сил», т. е. вращающий момент относительно какой-то оси. Это понятие полезно при рассмотрении блоков и рычагов.

Момент силы (который иногда называют *парой сил*) можно создать, надавив на спицы колеса. Если же при этом колесо остается в покое, то никакой работы не производится. В системе МКС момент силы измеряется в единицах *метр·ньютон*, а энергия в *ньютон·метр*. В этом курсе, однако, мы не касаемся ни самого момента сил, ни применений этого понятия для описания рычагов и создания углового ускорения.



Фиг. 23.

Человек, который поддерживает движение тележки по шероховатой поверхности, должен все время подталкивать ее вперед, а это требует от него затраты некоторого количества топлива-пищи.



Фиг. 24. а — Работа = $F \cdot s$; б — человек, толкающий тележку, передает ей энергию $F \cdot s$ и либо ускоряет ее, либо (на шероховатой дороге) просто поддерживает постоянное движение; в — статуя, толкающая тележку вбок. Сила F_m передает энергию, а сила F_L — нет.

Но сколько бы мы ни жали вбок, это не поможет движению и не требует топлива. Можно просто взять статую и опереть ее о бок тележки, поставив основание на роликовые коньки так, чтобы они

все время скользили вместе с тележкой. Это не потребует затрат топлива, кроме возмещения потерь на трение.

«Сухой остаток» предыдущих пунктов 1 и 2 можно сформулировать в следующих утверждениях:

А. *Работа* означает произведение *силы* на *расстояние*, пройденное точкой приложения силы в направлении ее действия.

Б. Измеряемая таким способом *работа* характеризует величину *энергии*, переданной с одного места на другое или перешедшей из одной формы в другую.

Теперь приступим к более подробному описанию энергии — величины, количество передачи которой измеряется работой.

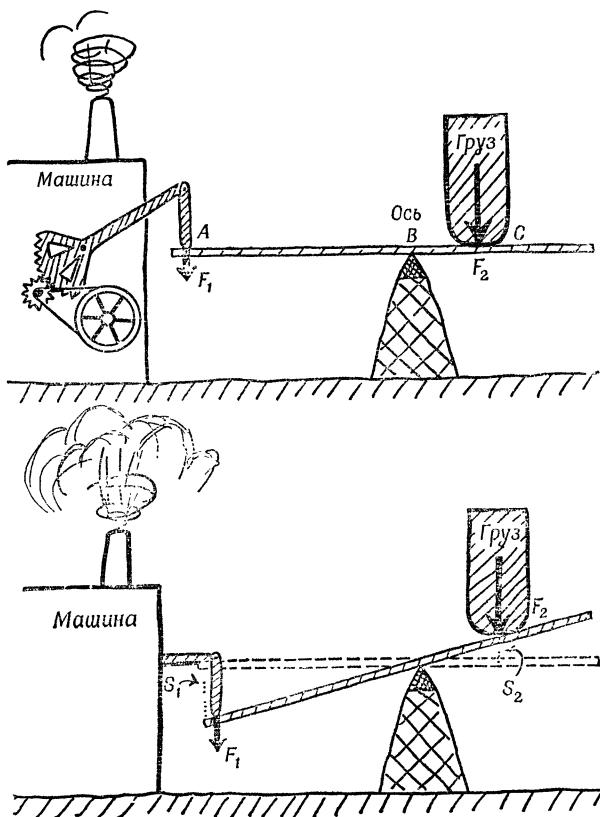
Топливо и цивилизация

Для современной цивилизации топливо — вещь необычайно важная. Для обогрева домов, приготовления пищи, для связи, для транспорта и работы всех механизмов в промышленности мы превращаем энергию, запасенную в огромных количествах топлива, в другие формы. Жизнь замерла бы, если бы мы лишились топлива. Но самое необходимое топливо — это пища. А нельзя ли изобрести такие машины, которые избавили бы нас от расхода такого количества топлива? Рычаги и системы блоков могут из маленькой *силы* сделать большую. Но могут ли такие «механизмы», как мы их называем в физике, увеличить также наши топливные ресурсы и выжать больше *энергии* из меньшего количества топлива? Такой «механизм» можно поставить в качестве посредника между потребляющей топливо машиной и работой. Разберем несколько типичных схем механизмов и посмотрим, чем они полезны.

Механизмы

1. *Рычаг или детские качели.* Детские качели используются и как игрушка, и как устройство для уравнивания сил. Однако при движении они могут передавать и энергию; надавив на один конец, можно заставить другой поднимать груз. Предположим, что машина (потребляющая топливо) прикладывает силу F_1 в точке А, а в точке В бруса ABC проходит ось (фиг. 25). Тогда второй конец может поддерживать в точке С более тяжелый груз. По мере того как машина давит на точку А, тяжелый груз в точке С поднимается. Но давайте подсчитаем изменение энергии, которое определяется не просто силой, а произведением силы на *расстояние*. Пусть конец А опустился на высоту s_1 . Передача энергии от машины к

механизму в точке A равна при этом $F_1 \cdot s_1$. Второй конец C толкает груз с силой F_2 , приподнимая его на высоту s_2 . Передача

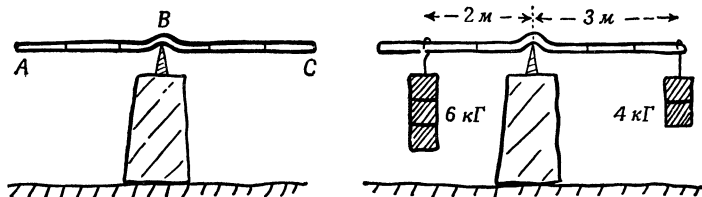


Фиг. 25. Машина поднимает груз при помощи рычага.

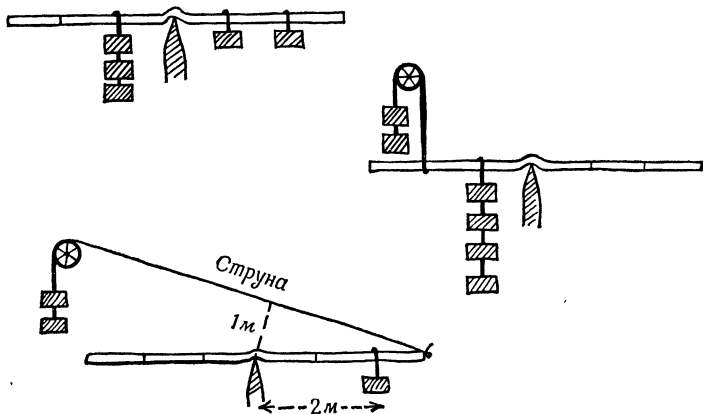
энергии от механизма к поднимаемому в точке C грузу равна работе $F_2 \cdot s_2$. Как же сравнить $F_1 \cdot s_1$ и $F_2 \cdot s_2$? Мы покажем, что они равны. Если F_2 во много раз больше F_1 , то s_2 точно во столько же раз меньше s_1 . Вот вам доказательство. Если вы еще не знаете правила уравновешенных качелей или рычагов, то их немедленно дают простые опыты.

Опыт 1. Брус ABC (фиг. 26) посажен на ось в точке B таким образом, что в ненагруженном состоянии он уравновешен. Грузы же под-

4 кг веса $\cdot 3 \text{ м} = 6 \text{ кг}$ веса $\cdot 2 \text{ м}$,
СИЛА $\cdot$ ПЛЕЧО = СИЛА $\cdot$ ПЛЕЧО,
причем длина плеча есть расстояние по перпендикуляру между осью и



Фиг. 26. Качели для проверки правила равновесия.
Сила $\cdot$ Плечо = Сила $\cdot$ Плечо.



Фиг. 27. Более сложные случаи уравновешенных рычагов.
В каждом из случаев сумма произведений (со знаками $+$ и $-$) Сила Длина плеча по перпендикуляру ст оси до линии силы равна нулю.

вешиваются так, как это изображено на рисунке: 4 кг на расстоянии 3 м от оси уравновешивается грузом на другом конце на расстоянии 2 м . Опыт показывает, что правый груз должен весить 6 кг . В этом примере ¹⁾

направлением действия силы. Для такого сбалансированного рычага

$$\frac{\text{СИЛА } 6 \text{ кг}}{\text{СИЛА } 4 \text{ кг}} = \frac{\text{ПЛЕЧО СИЛЫ } 4 \text{ кг}}{\text{ПЛЕЧО СИЛЫ } 6 \text{ кг}}$$

Величина груза обратно пропорциональна длине его плеча.

¹⁾ Эти произведения являются «моментами сил» в кгм .

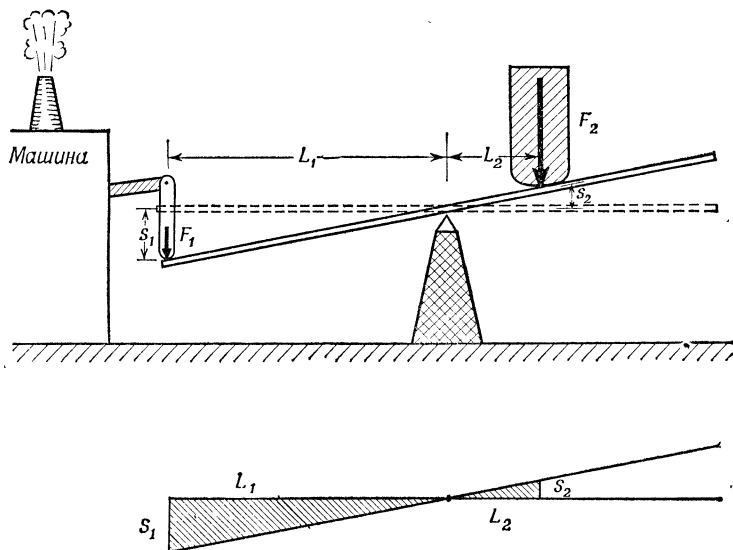
Опыт 2. Более сложный случай.
Вернемся теперь к рычагу, связывающему машину с грузом (фиг. 27). Из опыта мы знаем, что силы F_1 и F_2 обратно пропорциональны длинам плеч L_1 и L_2 , т. е. $F_2/F_1 = L_1/L_2$. Но из геометрии расстояния s_1 и s_2

фиг. 28, подобны):

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{s_1}{s_2}, \quad \frac{F_2}{F_1} = \frac{L_1}{L_2} = \frac{s_1}{s_2},$$

т. е.

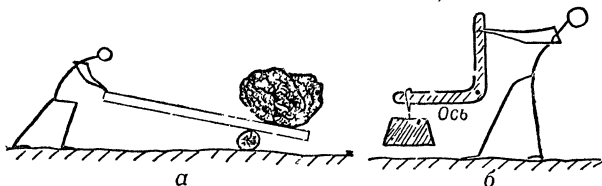
$$F_1 \cdot s_1 = F_2 \cdot s_2.$$



Фиг. 28. Работа машины.

Заштрихованные треугольники подобны. Следовательно, $L_1/L_2 = s_1/s_2$. В действительности, нагрузка и усилие перемещаются по дугам окружности, так что s_1 и s_2 немного искривлены, а «треугольники» на самом деле — секторы. Но к ним применимы те же рассуждения.

пропорциональны плечам L_1 и L_2 . Следовательно, обе передачи энергии, (треугольники, заштрихованные на работе $F_1 \cdot s_1$ и работа $F_2 \cdot s_2$, равны,



Фиг. 29. Рычаги могут пригодиться.

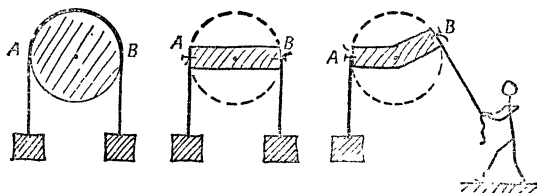
а — поднятие тяжелого груза; б — согнутый рычаг с одинаковыми плечами.

Работа $F_1 \cdot s_1$ — это передача энергии от машины к рычагу, а $F_2 \cdot s_2$ — передача энергии от рычага к грузу. Поскольку $F_1 \cdot s_1 = F_2 \cdot s_2$, то мы говорим, что рычаг получает и отдает равные количества энергии. Энергия на входе рычага равна энергии на выходе. Рычаг как механизм просто передает энергию, он не создает и не уничтожает ее. Это, однако,

не мешает рычагу быть очень полезным средством для получения нужной величины силы или изменения ее направления, хотя он и не решает проблемы топлива.

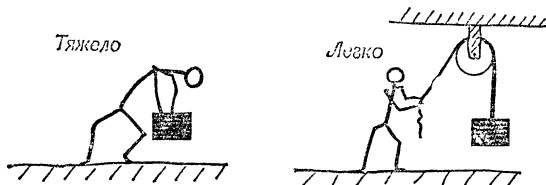
При наличии же трения в оси возникает небольшая сила сопротивления и некоторое количество вложенной энергии растрачивается бесполезно.

2. Блоки. Колесо блока работает как равноплечий рычаг ¹⁾ (фиг. 30). Оно изменяет *направление* силы и зачастую, если мы того



Фиг. 30. Блок подобен равноплечему рычагу.

хотим, довольно сильно, но если трение отсутствует и колесо идеально круглое, оно не меняет *величины* силы.



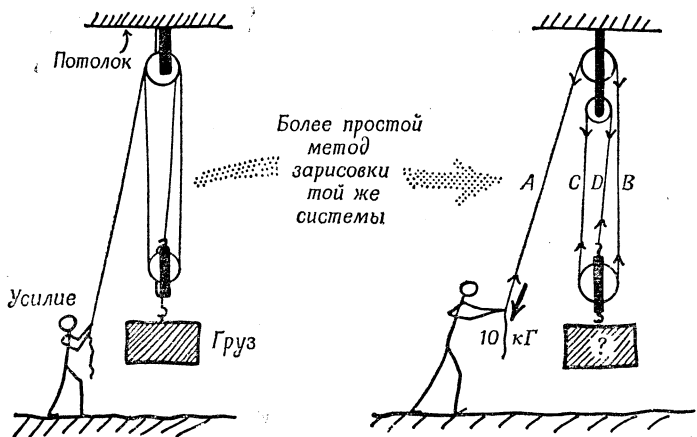
Фиг. 31. Блоки полезны.

Блок позволяет легко изменить направление силы

Таким образом, один блок не дает надежды изменить величину произведения силы на расстояние. А как насчет системы блоков —

¹⁾ Чтобы показать, что блок подобен равноплечему рычагу, представим себе, что его колесо сделано из дерева, а с обеих сторон висят одинаковые грузы (см. фиг. 30). Вобьем в точки A и B гвозди и прикрепим ими веревку к колесу. Отрежем теперь остаток колеса и веревки, останется обычный рычаг. Чтобы уравновесить его, грузы должны быть равны, так что мы были правы, подвесив первоначально на колесо одинаковые грузы. Если вместо одного груза за конец веревки тянет человек, мы все равно имеем дело с равноплечим рычагом, но одно плечо теперь изогнуто. Во всех случаях натяжение веревки по обе стороны колеса одно и то же. (При наличии трения колесо сопротивляется вращению и натяжение веревки на одном конце будет немного меньше, чем на другом.)

удивительных полиспастов, или талей, которые позволяют человеку поднимать громадные грузы, намного превосходящие его обычные возможности? Разберем изображенную на фиг. 32 систему, обращая иногда к вашему здравому смыслу (эквивалентному, как обычно, опытным знаниям, сложившимся в процессе воспитания и повседневной жизни). Подобная система блоков используется для



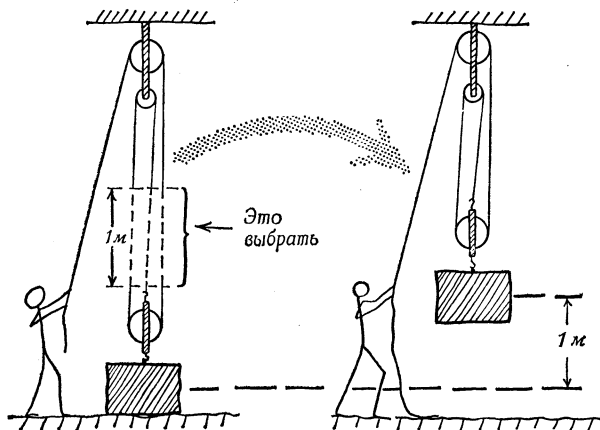
Фиг. 32. Система блоков; отношение сил.

Определение отношения сил (передаточного числа) для системы блоков. По всей веревке передается одно и то же натяжение. Стрелки показывают натяжение веревки: вниз от руки человека, вверх — от груза.

поднятия больших грузов. Какой груз сможет поднять такой механизм, если человек тянет веревку с силой 10 кг ? Шкивы блоков работают как равноплечие рычаги, изменяя направление силы, но не меняя ее величины, за исключением потерь на трение. Натяжение в 10 кг передается веревкой A через блок на веревку B и т. д. на веревки C и D. Натяжение каждой из веревок — это сила, с которой натягивается каждый ее конец¹⁾. Полная сила, действующая на веревки, прикрепленные к грузу, складывается из 10 кг натяжения веревки B + 10 кг натяжения веревки C + 10 кг натяжения веревки D. В сумме это дает силу 30 кг . Для равновесия, т. е. покоя или равномерного движения, она должна уравниваться весом груза. Следовательно, потянув с силой 10 кг , человек будет поднимать груз 30 кг , за вычетом, разумеется, потерь

¹⁾ Напомним, что натяжение веревки есть сила тяги на ее концах, причем на каждом из них она направлена к середине. Оказать давление с помощью веревки нельзя.

на трение. В реальных блоках трение требует своей небольшой доли и силой в 10 кг удастся поднять меньше 30 кг. Это приспособление в лучшем случае дает отношение *поднимаемого груза к силе*



Фиг. 33. Система блоков; отношение расстояний.

Определение отношения расстояний (отношения скоростей) для системы блоков. Представьте, что груз подняли на 1 м, и подсчитайте, сколько метров веревки нужно выбрать человеку.

тяги человека, равное 3 : 1. Отношение сил

$$\frac{\text{«НАГРУЗКА» (=ВЕС ПОДНИМАЕМОГО ГРУЗА)}}{\text{«УСИЛИЕ» (=УСИЛИЕ, ПРИЛАГАЕМОЕ ЧЕЛОВЕКОМ)}} ;$$

ИЛИ

$$\frac{\text{«СИЛА НА ВЫХОДЕ»}}{\text{«СИЛА НА ВХОДЕ»}}$$

часто называется *передаточным числом* механизма. Наш набор блоков обладает передаточным числом, равным 3/1. Но это «теоретическое» значение для идеального механизма без трения. Практически же передаточное число из-за трения будет меньше 3/1.

Сравним теперь *расстояния*, пройденные тянущей рукой и поднятым грузом, или же их *скорости движения*. Для этого проще начать рассуждения с груза. Предположим, что груз поднят на высоту 1 м, скажем, какой-то магической силой, и у веревок образовалась «слабина». Уберем ее, вырезав в каждой из веревок *B*, *C* и *D* по метровому куску и вновь соединим их. Если эти три метровых куска не вырезать, то у каждой из веревок *B*, *C* и *D* была бы метровая слабина или в сумме трехметровая слабина. На самом

же деле груз поднимается только за счет подтягивания конца А. Поэтому человек должен выбрать 3 м веревки. Отношение длин

$$\frac{\text{ДЛИНА ВЕРЕВКИ, ВЫБРАННОЙ ЧЕЛОВЕКОМ}}{\text{РАССТОЯНИЕ, ПРОЙДЕННОЕ ГРУЗОМ}}$$

часто называют *отношением скоростей* механизма, так как оно задает также отношение

$$\frac{\text{СКОРОСТЬ ВЫБИРАНИЯ ВЕРЕВКИ}}{\text{СКОРОСТЬ ГРУЗА}}.$$

Для нашей машины оно, очевидно, равно 3/1. И вновь «сколько выиграно в силе, столько же проиграно в расстоянии».

Сравним теперь передачу энергии в нашем примере: *работа на входе* равна $10 \text{ кГ} \cdot 3 \text{ м}$, или 30 кГм . *Работа на выходе* в лучшем случае равна $30 \text{ кГ} \cdot 1 \text{ м}$, или 30 кГм . За исключением потерь на трение, механизм не создает и не уничтожает энергии, а только передает ее, трансформируя ¹⁾ силу тяги рук в нужную нам большую силу. Трение же поглощает часть энергии, превращая ее в теплоту.

Вы наверняка поймете эти простые рассуждения с блоками после проработки задач 1 и 2.

Покажите, что каждый из механизмов, описанных ниже, облегчает передачу энергии, не изменяя произведения сила на расстояние, которое измеряет количество переданной энергии. (Рассмотрите идеальный случай без трения. Трение превращает часть поступающей энергии в теплоту.)

Задача 1. Простая система блоков

В изображенной на фиг. 34 системе одна веревка проходит через несколько идеальных блоков. Чтобы найти возрастание силы, заполните пропуски в следующих рассуждениях.

Предположим, что человек тянет с силой 10 кГ.

Натяжение веревки А равно _____ кГ.

При отсутствии трения натяжение веревки В равно _____ кГ.

Натяжение веревки С равно _____ кГ.

Натяжение веревки D равно _____ кГ.

Натяжение веревки E равно _____ кГ.

Веревка передает только натяжение, но не сжатие, так что груз W тянется с силой _____ + _____ ... кГ.

Груз W должен весить _____ кГ.

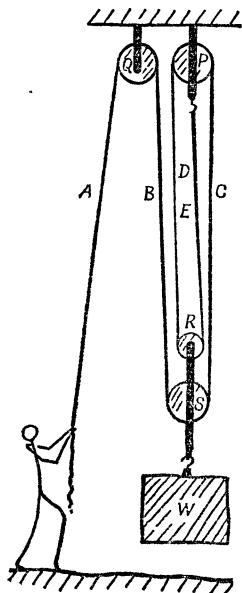
¹⁾ Слово «трансформировать» используется здесь в том же смысле, что и в электротехнике. Трансформатор преобразует электроэнергию (с небольшими потерями), изменяя по нашему желанию *напряжение*. Однако он изменяет, кроме того, и *ток*, так что *мощность* остается прежней.

Сила возрастает в _____ раз.
 Чтобы найти расстояния, проведите следующие рассуждения. Предположим, что груз W поднялся на 1 м, тогда каждая из веревок _____, _____, _____ сократится на 1 м.

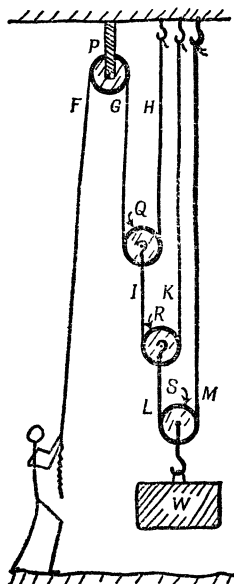
Человек выбрал _____ м слабину.

Пройденное расстояние изменилось в _____ раз.

Предположим, что блок Q на потолке удален и человека заставили тащить конец B вверх. Как это повлияет на передаточное число системы и отношение скоростей? Как это изменение скажется на эффективности системы?



Фиг. 34. К задаче 1.



Фиг. 35. К задаче 2.

Задача 2. Система блоков

Система состоит из трех веревок FGH , IK , LM , каждая из которых одним концом прикреплена к потолку. Человек тянет за другой конец веревки FGH . Концы веревок IK и LM прикреплены к осям блоков Q и R , как показано на фиг. 35. Предположим, человек тянет за веревку F с силой 10 кГ. Тогда веревки, поддерживающие блок Q , тянут его вверх с силой _____ кГ. Но эта сила должна уравновешиваться натяжением веревки I .

Следовательно, натяжение веревки I должно быть равно _____ кГ. Аналогично общая сила тяги веревок, поддерживающих R , равна _____ кГ.

Продолжая эти рассуждения, находим, что груз W должен весить _____ кг.

Следовательно, сила возрастает в _____ раз.

Предположим, что груз W поднялся на 1 м.

Блок S поднялся на 1 м. Это приведет к слабине _____ м у веревки

LM . Чтобы убрать слабину, блок R должен подняться на _____ м.

Согласно аналогичным рассуждениям, блок Q должен подняться на _____ м. Человек должен выбрать _____ м веревки F .

Расстояние изменяется в _____ раз. Изменяет ли эта система (без учета потерь на трение) величину произведения силы на расстояние?

(да, нет)

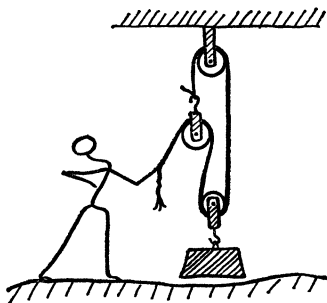
Наука и слепые правила

Попробуйте угадать отношение сил и скоростей в системе блоков, изображенной на фиг. 35. Воспользовавшись рассуждениями типа приведенных выше (и которые требуются в задачах), вы правильно найдете отношение сил и расстояний. Если же вы будете исходить лишь из школьных правил, то можете получить неверный ответ ¹⁾.

Задача 3

Если вы не боитесь трудностей, попробуйте разобраться в поведении «дурацких» талей, изображенных на фиг. 36. Если потребуется — смастерите их.

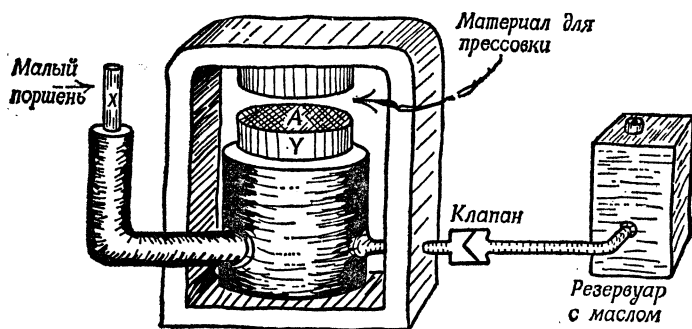
Фиг. 36. К задаче 3.



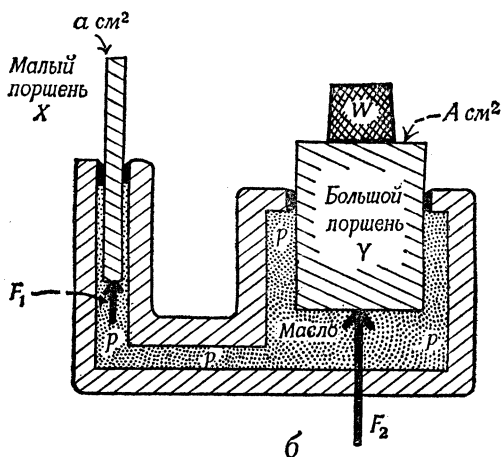
¹⁾ Правила, предназначенные для зазубривания, опасны и создают у мыслящих людей неправильное представление о науке. Они предназначены для бездумных ответов на экзаменах и справочников, которыми пользуются посредственные специалисты. (Посредственные специалисты—это те, кто слепо верит формулам, полагая, например, что формула для распределения напряжений в деревянном бруске применима к любой конкретной балке. Впрочем, такой инженер может оказаться даже полезным и хорошим работником, но при условии, что сам сознает свою ограниченность. Первокласный специалист стремится узнать, что происходит на самом деле и почему. Он интересуется и тем, откуда взялась данная формула. Это ученый в душе, но с практическим складом ума. Такие люди редки и обычно работают очень успешно.)

Гидравлический пресс

Неподвижные жидкости и газы передают, не изменяя, давление во всех направлениях и на любые расстояния (за исключением



а



б

Фиг. 37. Гидравлический пресс.

а — цилиндр и большой поршень помещены в обойму, материал для прессовки сжимается между большим поршнем и неподвижной обоймой; б — разрез; обойма не показана. Важная деталь, обеспечивающая хорошую работу пресса, — непроницаемый поршень, очень похожий на поршень велосипедного насоса.

возрастания давления с глубиной). В этом состоит закон Паскаля. Экспериментальным подтверждением этого закона служит любая

водопроводная система. Гидравлические прессы позволяют создавать легко управляемые громадные усилия для выжимания масла из семян, прессовки сена, штамповки чушек и т. д. Большие силы получаются из малых за счет давления жидкости на разные поршни. На фиг. 37 показан простейший пресс. Масло передает давление, создаваемое малым поршнем X , большому поршню Y . Когда X движется вниз, Y движется вверх, поднимая груз W . (Для обеспечения повторных ходов поршня X в его цилиндр поступают из резервуара дополнительные порции масла.) Если давление в масле составляет p кг/см², то оно давит

на малый поршень площадью a см² с силой $F_1 = p \cdot a$ кг,
на большой поршень площадью A см² с силой $F_2 = p \cdot A$ кг.

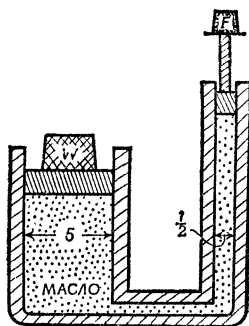
А отношение сил

$$\frac{pA}{pa} = \frac{A}{a}.$$

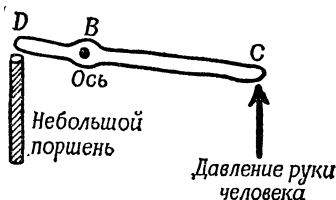
Следовательно, если площадь большого поршня намного превышает площадь малого, то он сможет выдержать гораздо большую нагрузку. Теперь переходите к задаче 4.

Задача 4. Гидравлический пресс

Диаметр малого поршня гидравлического прессы, изображенного на фиг. 38, равен 0,5 см, а диаметр большого — 5 см, т. е. в 10 раз больше. Площадь большого поршня в _____ раз больше площади малого. Давление масла на оба поршня одинаково.



Фиг. 38.



Фиг. 39.

Сила, с которой масло давит на большой поршень, должна быть в _____ раз больше силы давления на малый.

По мере продвижения малого поршня вниз какой-то объем масла переходит из малого цилиндра в большой и поднимает большой поршень.

[Примечание. Объем цилиндра = (высота) · (площадь основания).]

Если масло не изменяет своего объема, то уменьшение объема малого цилиндра равно увеличению объема большого, а так как площадь большого поршня в _____ раз больше площади малого, то расстояние, пройденное им, составляет _____ от расстояния, пройденного малым поршнем.

Предположим теперь, что вместо непосредственного давления на малый поршень человек, работающий с прессом, воспользовался рычагом DBC (фиг. 39), закрепленным на оси в точке B , который давит на малый поршень в точке D , если его потянуть вверх в точке C ; $DB=5$ см, $BC=20$ см. Рычаг позволяет человеку поднять груз в _____ раз больший, чем прежде. Полное отношение сил (передаточное число) равно теперь _____.

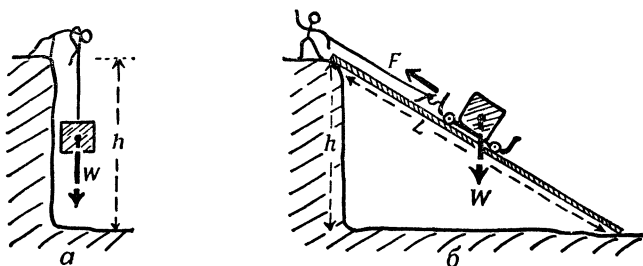
Однако большой поршень перемещается на гораздо меньшее расстояние, чем малый. Объем масла, выдавленного из малого цилиндра поршнем, равен произведению площади на ход поршня s_1 , или $a \cdot s_1$. Этот объем перекачивается в большой цилиндр и давит на большой поршень. Если последний поднимается на высоту s_2 , то объем масла, заполнившего освободившееся пространство, равен $A \cdot s_2$, а поскольку масло почти несжимаемо, объем $a \cdot s_1$ равен объему $A \cdot s_2$. Итак, отношение перемещений $s_1/s_2 = A/a$, но отношение сил также равно A/a , следовательно,

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{A}{a} = \frac{s_1}{s_2}.$$

И снова «насколько мы выигрываем в силе, настолько же проигрываем в расстоянии», так что

РАБОТА НА ВХОДЕ $F_1 s_1$ = РАБОТА НА ВЫХОДЕ $F_2 s_2$.

Наклонная плоскость



Фиг. 40. Поднятие груза.

a — прямое поднятие груза W на высоту h ; b — поднятие по наклонной плоскости без трения.

Вместо того чтобы тянуть груз вертикально, мы можем поместить его на тележку и воспользоваться наклонной плоскостью

(фиг. 40). Однако спасает ли это от растраты энергии? Когда мы поднимаем груз весом W вертикально на высоту h , то изменение энергии, т. е. *работа*, равно $W \cdot h$. Вкатывание же его по склону требует *работы* $F \cdot L$. Так что *изменение энергии* при вертикальном подъеме равно $W \cdot h$, а при наклонном $F \cdot L$. Но в гл. 7¹⁾ мы показали, что без учета трения $F/W = h/L$, т. е. $F \cdot L = W \cdot h$.

Переход энергии от человека к грузу при любом способе будет одним и тем же.

РЕЗЮМЕ

Все попытки сэкономить энергию безрезультатны.

Что же такое энергия?

До сих пор мы так и не дали четкого определения энергии, а возможно, никогда и не сможем дать даже расплывчатого. Но после всех рассуждений о работе и топливе вы должны почувствовать, что ближе познакомились с энергией. Со временем это знакомство должно перерасти в ясное представление. Так, вы можете не соглашаться с каким-то определением справедливости, доброты, любви, но имеете право утверждать: «Я отлично знаю, что это означает. Я *понимаю* это». Так что пока энергия для вас—это *нечто, содержащееся в топливе, нечто, способное переходить из одной формы в другую, причем количество переданной энергии измеряется произведением силы на расстояние*. Переход энергии измеряется работой, поэтому «официальное» определение энергии гласит: «*энергия — это способность производить работу*». Качественно такое определение не слишком полезно; оно просто говорит: «если нечто обладает большой энергией, то оно способно передать много энергии чему-то другому». Количественно оно указывает лишь, что *энергия должна измеряться в тех же единицах, что и работа*.

Единицы энергии

Поскольку *передачу* энергии мы измеряем произведением *сила на расстояние* с размерностью:

$$(\text{кГ}) \cdot (\text{метр}), \text{ или } (\text{ньютон}) \cdot (\text{метр}),$$

то в тех же единицах мы должны измерять и энергию.

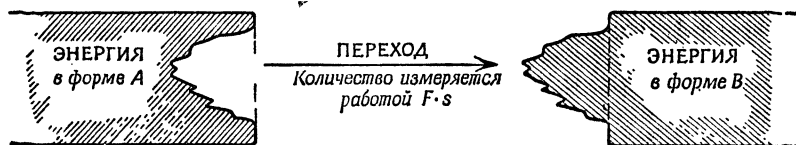
¹⁾ Гл. 7 («Сила и движение») входит в т. 1 настоящего издания.

Первая из этих единиц не слишком хороша. Ее часто применяют в технике, но это неподходящая единица для энергии движущихся тел в связи с тем, что $F=ma$. А вот вторая единица (*ньютон*)·(*метр*) вполне годится. Ею настолько часто пользуются, что она получила новое имя—*джоуль* (сокращенно *дж*). Поскольку 1 *ньютон* приблизительно равен $\frac{1}{10}$ *кГ*, то 1 *дж* приблизительно равен $\frac{1}{10}$ *кГм* (точнее, 0,102). Однако в *кГм* входит «плохая» единица *силы* — *кГ*, тогда как в *ньютон килограмм* вошел в качестве единицы *массы*.

У нас еще нет способа измерить полную энергию, что бы эта «полная энергия» ни означала. Используя произведение *сила* на *расстояние* или *работу* в качестве меры переданной энергии, мы можем измерять только некоторые из ее переходов. Именно такие переходы энергии измеряются в *джоулях* или *килограммометрах*.

Формы энергии

Наблюдая за переходами энергии и измеряя их величину произведением *сила* на *расстояние*, мы можем описать некоторые из ее форм.



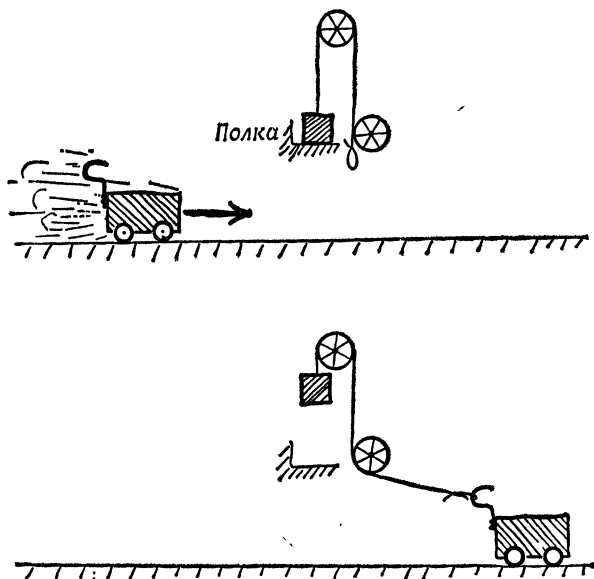
Фиг. 41. Работа.

Закрученная пружина обладает запасом *упругой энергии*, или *энергии деформации*. Груз, поднятый над землей, запасает *энергию силы тяжести*. Нефть или бензин обладают *химической энергией*, которую можно превратить в энергию силы тяжести, заставив машину поднимать груз. В фейерверочных ракетах и взрывчатке запасена *химическая энергия*, которая может внезапно высвободиться. Пища также обладает запасом *химической энергии*, часть которой наше тело превращает в упругую энергию или энергию силы тяжести, когда мы закручиваем пружину или поднимаем груз.

Движущаяся тележка также обладает запасом энергии за счет своего движения, ибо, если к ней прицепить веревки и блоки, она

сможет поднимать грузы. Однако при этом она должна терять часть энергии своего движения. Такую энергию движения мы называем *кинетической энергией*¹⁾. Обратите внимание, что в наших рассуждениях об энергии предполагается, что она никогда не была создана и никуда не теряется, а только преобразуется.

Если передвинуть тележку с одного места на другое, оставаясь на том же уровне над землей, то энергия силы тяжести не изменится. Когда движение начинается и заканчивается состоянием покоя, то



Фиг. 42. Превращение кинетической энергии в потенциальную.

Движущаяся тележка зацепляется за веревку, которой можно поднять груз. По мере поднятия груза тележка тормозится.

мы можем считать его «свободным», т. е. в конечном итоге переход энергии *отсутствует*. Пусть тележке сообщена небольшая кинетическая энергия (заимствованная из некоего источника энергии силы тяжести или химической энергии) и ей дана возможность, не

¹⁾ От греческого слова, означающего «движение»; аналогичное происхождение и у слова «кино».

меня уровня, переехать без трения на новое место. Остановим ее там, отобрав кинетическую энергию (и возвратив ее источнику). Нетрудно вообразить устройство, например наподобие изображенного на фиг. 42, которое может сделать все это.

Известно, что тележка, движущаяся с некоторой кинетической энергией по шероховатому полу, останавливается. Пропадает ли ее энергия или только переходит куда-то? Придерживаясь своего убеждения, мы ищем новую форму энергии. При трении шероховатых поверхностей должна выделяться теплота. Но можно ли говорить о *тепловой энергии*? Прежде теплоту считали формой энергии. Она рассматривалась как некая неразрушимая жидкость. И целый ряд замечательных экспериментов, проведенных еще в прошлом веке, показал, что теплота—все-таки форма энергии. После этого в схему были включены еще несколько форм, тем самым была создана великая система энергии, постоянной в любой замкнутой области. «Закон сохранения энергии» разбирается нами в гл. 29, а сейчас попытаемся нарушить этот закон, создав механический вечный двигатель.

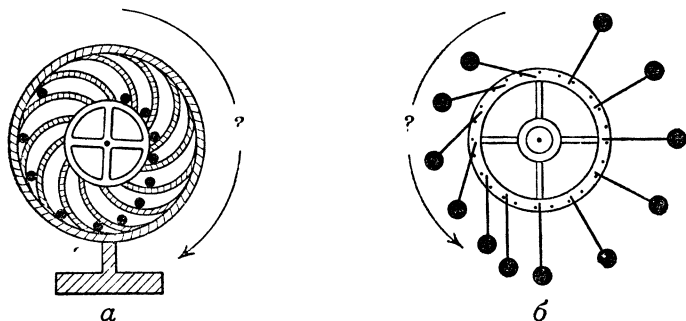
Вечный двигатель

Простейшие механизмы, такие, как рычаги и блоки, преобразуют силы и скорости в соответствии с нашими желаниями и даже довольно сильно. Однако потребление топлива, измеряемое произведением *сила на расстояние*, не изменяется и даже возрастает, если учесть потери на трение. Полезная энергия на выходе механизма равна энергии на входе, уменьшенной потерями на трение. И все же на протяжении веков человек стремился избежать затрат топлива, а искушение и надежда и по сей день все также необычайно велики. Возможно, что рычаги и блоки слишком примитивны. Не может ли более хитрый механизм выдать энергии больше, чем получил? Это были поиски «вечного двигателя», вошедшие теперь в список «великих заблуждений науки».

Такой механизм действительно принес бы своему изобретателю вечную славу, ибо он, разумеется, перевернул бы весь ход цивилизации. О таких механизмах мы говорим как о «вечных двигателях». Сейчас мы убедились, что сделать их невозможно. Название «вечный двигатель» не совсем удачно, так как может наводить на мысль, что самое главное — ликвидировать трение и получить таким образом то, что можно назвать *вечным движением*. Если бы цель заключалась только в этом, то мы почти достигли бы ее, скажем, с помощью колес, вращающихся на шарикоподшипниках, а в Природе оно давно существует в виде вращения Земли, движения планет, атомов и т. д. Однако эти случаи *вечного движения* не могут служить *вечными двигателями*, ибо если мы попытаемся отобрать энергию, то все замедлится и в конце концов остановится.

Вечный двигатель должен, конечно, крутиться сам по себе, восполняя какие-то небольшие расходы на трение из дополнительной энергии на выходе. Но самая существенная особенность — непрерывное движение или постоянное вращение было бы просто «вечным движением», красивым, но бесполезным. Чтобы принести вечную славу и богатое вознаграждение своему создателю,

двигатель должен не просто постоянно крутиться, подкармливая только самого себя. Энергия на его выходе должна превышать энергию на входе так, чтобы он мог обеспечивать себя, оставляя еще, кроме того, кое-что для полезной «бесплатной» работы. Он должен был бы постоянно давать прибыль работы без затрат топлива. Он должен был бы, постоянно двигаясь, быть способным *поднимать грузы* или, работая вхолостую, двигаться все *быстрее и быстрее*. Такой двигатель, обеспечивающий постоянное снабжение энергией из ничего, мы и называем вечным. Можно ли создать подобный механизм? На протяжении веков за решение этой проблемы неоднократно предлагалось огромное вознаграждение. Она манила виднейших мыслителей и интриговала талантливейших конструкторов. Но все попытки были тщетны. Всегда находилась какая-нибудь «загвоздка». Решения предлагались и известными учеными-изо-



Фиг. 43. Простой проект вечного двигателя.

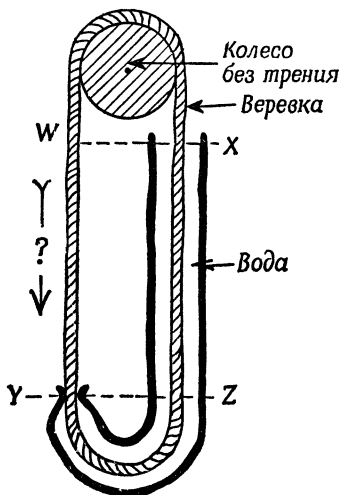
а — в отделениях колеса находятся шарики; *б* — к колесу на спицах приделаны грузы, которые могут поворачиваться между ограничителями на ободе.

бретателями и болтунами-шарлатанами. Предпринимателей соблазняли возможные баснословные барыши; некоторые рисковали своими деньгами и теряли их, когда двигателя не получалось или шарлатан-изобретатель скрывался. Шло время и предложения становились более сложными. Простые колеса с откидными спицами или скользящими грузами уступали место механизмам со сложными зубчатыми передачами, схемам, в которых электромотор и генератор крутят друг друга с отдачей энергии ¹⁾ и даже с заманчивым использованием жидкого воздуха. Все это действительно было испробовано и оказалось безуспешным. *Все попытки получить постоянный приток энергии без использования топлива провалились.* Во всех проектах в результате критического разбора даже без построения рабочей модели были обнаружены ошибки, так что их неудача предсказывалась уже на основе общих знаний. Это настолько убедило ученых в невозможности создания вечного двигателя, что теперь они возвели свое убеждение в общий принцип, называемый часто *Первым законом термодинамики*.

¹⁾ Мотор и генератор почти в состоянии поддерживать движение друг друга, если от них не требуется отдачи «вовне» (*вечное движение*). Мотор с помощью ремня крутит генератор, а тот снабжает током мотор с небольшой добавкой от батарей для компенсации потерь на трение и нагревание проводов. Такое устройство используется как экономичная схема при испытании машин.

Если мы поверим в невозможность *механического* вечного двигателя, то отсюда уже рукой подать и до уверенности в сохранении энергии. Механизм не может создавать энергию, а может только поглощать часть ее. И лишь когда мы учтем тепло и т. п., то сохранение энергии гарантировано.

На какую же точку зрения встанете вы сами? Продолжите ли поиск вечного двигателя или безоговорочно примете категорический отказ ученых от него? Ввиду очевидности последнее, по-видимому, разумнее. По крайней мере



Фиг. 44. Простой проект вечного двигателя.

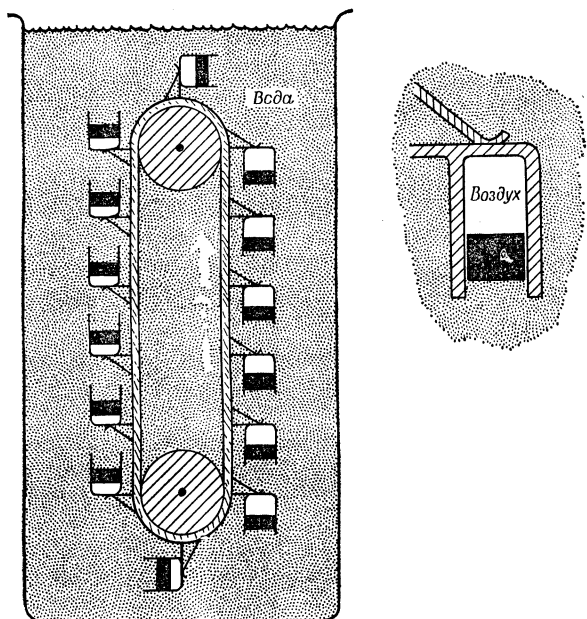
Бесконечная веревочная петля частично погружена в воду. Соединение Y должно быть идеально гладким и не допускать утечки, но это требование не может служить препятствием.

мы не советуем вам начинать с сомнений и с постановки собственного эксперимента. Впрочем, то, что вам приходится платить за бензин или электричество, есть в некоем смысле результат эксперимента; механизма, способного *создавать* топливо, не существует. Не лучше ли удовлетвориться доскональным разбором таких механизмов и убедиться, что сооружение из рычагов и блоков нельзя превратить в вечный двигатель? Попробуйте найти «загвоздку» в более сложных устройствах, предлагавшихся в качестве вечных двигателей. После этого вы, быть может, станете, как и все ученые, защитником общепринятого убеждения, что вечный двигатель невообразим, невозможен, противостоит естеству.

Обратите внимание, однако, что это утверждение не имеет доказательств. Это своеобразный сплав *результатов экспериментальных проверок* и *символа веры*¹⁾. Ученые, хорошо знакомые с перепутанным клубком подтверждений,

¹⁾ «Нельзя получить нечто из ничего». Это утверждение — не очень остроумная попытка оправдать нашу веру. Практически из ничего можно получить очень многое, если речь идет о счастье, безрассудстве — о чем угодно, за исключением некоторых точно определенных величин наподобие импульса и энергии. На деле физики очень много занимались (и продолжают заниматься) выделением и определением тех величин, которые нельзя получить «из ничего». Так что утверждение «нельзя получить нечто из ничего» применимо к энергии, но не доказывает невозможности вечного двигателя. В науке следует избегать ссылки на это в сущности бессодержательное утверждение.

стойко придерживаются этой точки зрения. Впрочем, ещё в наше время существовали два великих убеждения: сейчас мы можем создавать и разрушать вещество и один химический элемент превращать в другой. Теперь мы воздерживаемся называть мечту алхимиков о превращении свинца в золото одним из «заблуждений науки». Почему же мы так уверены в сохранении энергии и невозможности вечного двигателя? Частично из-за многочисленности и разнообразия подтверждений, частично из-за того, что самая идея энергии искусственна и



Фиг. 45. Ещё один проект вечного двигателя.

К бесконечной ленте, пропущенной через два блока (трение отсутствует), и помещенной в воду, прикреплены чашечки с воздухом, закрытые тяжелым поршнем. Когда чашечки повернуты вверх (слева), воздух сжимается весом поршня больше, чем когда они повернуты вниз. Следовательно, чашечки слева вытесняют меньше воды, чем справа, и должны испытывать меньшую выталкивающую силу. (Хотя в блоках, как и в поршнях, трение быть не должно, существенное препятствие не в этом.)

создана специально для того, чтобы выразить результат наших размышлений над окружающим миром, наше впечатление о нем. Так что в отличие от математики, о которой мы можем сказать, что она существует, энергия — наше собственное изобретение, построенное так, чтобы сохраняться, даже если наши представления о ней будут меняться из года в год. К тому же расширение нашего представления об энергии, каким бы фантастическим оно ни казалось вначале, с течением времени находит все большее и большее подтверждение. Тем не менее сохранение энергии должно свидетельствовать о чем-то очень важном в устройстве Вселенной.

Измерение различных форм энергии

В те времена, когда впервые сформировалось ясное представление об энергии, были известны только такие формы, как кинетическая энергия движения, потенциальная энергия силы тяжести и упругая потенциальная энергия. В отличие от кинетической энергии последние две формы назывались потенциальной ¹⁾. Сумма кинетической и потенциальной энергий остается постоянной при множестве простых механических изменений: падении камней, раскручивании пружин, движении систем грузов и блоков. Это сохранение (кинетическая энергия + потенциальная энергия = const) не удивительно, ибо, как мы видели, именно с учетом этого равенства была определена кинетическая и выбрана потенциальная энергия. Интересно, что возникающее в результате представление об энергии просто и удобно для работы. Остается только удивляться и восхищаться тем, что систему эту можно дополнить другими формами энергии до великого закона сохранения — мощнейшего орудия физической теории.

Потенциальная энергия силы тяжести

Сжигая топливо или используя другие источники энергии, можно поднять груз вертикально вверх. При этом работа, равная произведению *вес на прирост высоты*, определяет энергию, переданную топливом полю силы тяжести.

$$\Delta (\text{ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ}) = \text{ВЕС} \cdot \Delta \text{ВЫСОТЫ}.$$

Нам трудно указать местоположение этого прироста энергии, но его величина точно определена и поднятый груз, несомненно, «обладает» им.

Когда потенциальная энергия уменьшается,

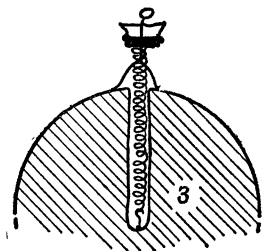
$$\Delta (\text{ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ}) = \text{ВЕС} \cdot \Delta \text{ВЫСОТЫ}.$$

При этом как Δ (*потенциальной энергии*), так и Δ *высоты* отрицательны, или

$$\text{УМЕНЬШЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ} = \text{ВЕС} \cdot \text{ВЫСОТА ПАДЕНИЯ ПО ВЕРТИКАЛИ}.$$

¹⁾ Потенциальной называлась энергия, которая способна превращаться в движение, но остается скрытой. Кинетическая же энергия, очевидно, та, что «несется» вместе с движущимся телом.

Опыт 3. Чтобы приобрести хотя и ложное, но полезное «ощущение»



Фиг. 46.

потенциальной энергии силы тяжести, сделайте такой эксперимент. Держа обеими руками тяжелую кни-

гу, крепко упритесь ногами в пол. Закройте глаза и несколько раз медленно поднимите и опустите книгу. Как только вы почувствуете вес книги, вообразите, что никакой силы тяжести на самом деле нет, а книга притягивается длинной-предлинной пружиной, прикрепленной где-то внизу, в центре Земли (фиг. 46). Нарисуйте в своем воображении такую пружину и почувствуйте, как вы растягиваете ее, поднимая книгу вверх. Если вы очень постараетесь вообразить это, то почувствуете, что такая пружина и впрямь существует. А теперь, оставаясь с закрытыми глазами, подумайте об энергии, запасенной в растянутых кольцах пружины.

Энергия упругой деформации (энергия, запасенная в растянутой пружине, и т. п.)

Растянутая, сжатая или закрученная пружина, изменившая свою нормальную форму, запасает в себе потенциальную энергию. Мы утверждаем это не потому, что видим некую энергию, запасенную в деформированном металле, а потому, что, позволив пружине уменьшить свою деформацию, можем произвести работу, измеряемую произведением *сила на расстояние*. Мы знаем также, что работа, т. е. произведение *сила на расстояние*, была затрачена при создании деформации. Эту энергию мы называем *потенциальной энергией упругой деформации* и можем считать, что она запасается силовым полем, действующим между атомами или молекулами пружинящего материала:

$$\text{ЭНЕРГИЯ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ} = \left(\begin{array}{c} \text{СРЕДНЯЯ СИЛА} \\ \text{ПРИ СЖАТИИ} \\ \text{ПРУЖИНЫ} \end{array} \right) \cdot \left(\begin{array}{c} \text{ВЕЛИЧИНА} \\ \text{СЖАТИЯ} \end{array} \right).$$

Газы тоже пружинят и им также можно приписать энергию деформации. Но если представить себе молекулы газа, которые носятся хаотически взад и вперед, то такая мысль покажется абсурдной. Так как молекулы постоянно находятся в движении, возникает подозрение, что энергия, запасенная в газе, есть на самом деле кинетическая энергия молекулярного движения, а вовсе не упругая энергия ¹⁾.

¹⁾ Энергия газа — это энергия молекулярного движения, и мы называем ее *тепловой*. Можно сказать, что «теплота есть движение молекул»,

Кинетическая энергия. Энергия движения

Теперь мы покажем, что энергия движения, «кинетическая энергия», должна вычисляться по правилу

$$E_{\text{кин}} = \frac{1}{2} (\text{МАССА}) \cdot (\text{СКОРОСТЬ})^2.$$

Оно получается из формулы $F=ma$. Пусть сила F ускоряет массу M , перемещая ее на расстояние s . Если вначале масса покоилась и затем достигла скорости v , то переданная ей энергия Fs равна $\frac{1}{2}Mv^2$.

Если мы толкаем тело с силой F_1 , то передаем ему энергию, равную F_1s . Если же вдобавок на движущееся тело действует противоположная сила F_2 , то оно отдает энергию F_2s препятствию движения. В итоге движущееся тело приобретает энергию $F_1s - F_2s$, или $(F_1 - F_2)s$.

Но $(F_1 - F_2)$ есть результирующая действующих на тело сил F . Так что *чистая передача энергии* движущемуся телу равна

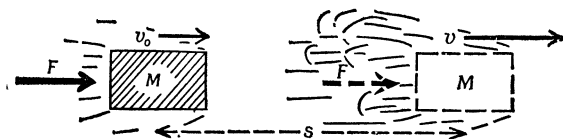
$$(F_1 - F_2)s, \text{ или } \text{РЕЗУЛЬТИРУЮЩАЯ СИЛА} \cdot s, \text{ или } F \cdot s.$$

Результирующая сила F полностью идет на ускорение тела, заставляя его двигаться быстрее и увеличивая его кинетическую энергию. Поэтому работа $F \cdot s$ показывает, сколько энергии превратилось в энергию движения. Предположим теперь, что, толкая массу M с *результирующей силой* F на *расстоянии* s , мы сообщили

но избегайте утверждать, что «теплота происходит из-за соударения молекул». Это совершенно неверно. При столкновении одна молекула может передать некоторую энергию другой. Но соударение молекул не может создать тепла и уж, конечно, не является теплом. Если бы движущиеся молекулы газа внешне «сжежились», столкновений стало бы меньше и при той же скорости молекул газ сохранил бы свою тепловую энергию. Ошибка, по-видимому, возникает из-за представления о молекулах как о шероховатых шариках, которые при столкновении трутся друг о друга. А они при соударении просто сближаются, отталкиваются и разлетаются в разные стороны. Молекулы вовсе *не похожи на шероховатые шарики*. Шероховатость — это беспорядочные скопления молекул на поверхности тела. Реальное трение — просто сцепление молекул друг с другом. И хотя оно может превратить кинетическую энергию движущегося тела в тепловое движение отдельных молекул, оно не может создать какого-то нового вида энергии.

Если молекулы газа ударяются о *движущийся* поршень, они отскакивают от него с другой скоростью — с большей, если поршень приближается к ним. При соударении с поршнем «теплота» все же увеличивается, но это происходит за счет энергии поршня, а вовсе не за счет таинственного акта, называемого соударением.

ей некоторую кинетическую энергию. Тогда передача энергии движущемуся телу будет равна $F \cdot s$, а поскольку F — *результатирующая* сила, действующая на массу M , то $F = Ma$. Для такого ускоренного движения воспользуемся соотношением $v^2 = v_0^2 + 2as$, ко-



Фиг. 47.

торое приводит к $as = \frac{1}{2}v^2 - \frac{1}{2}v_0^2$ («элегантный» вывод этого соотношения дан в приложении I к гл.1)¹⁾:

$$F \cdot s = (Ma) s = M(as),$$

но

$$as = \frac{1}{2}v^2 - \frac{1}{2}v_0^2.$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} F \cdot s &= \frac{1}{2} Mv^2 - \frac{1}{2} Mv_0^2 = \\ &= \left(\frac{1}{2} Mv^2 \text{ в конце} \right) - \left(\frac{1}{2} Mv^2 \text{ вначале} \right) \\ &= \text{Приращение} \left(\frac{1}{2} Mv^2 \right) \\ &= \Delta \left(\frac{1}{2} Mv^2 \right). \end{aligned}$$

Однако $F \cdot s$ — это переход энергии в энергию движения, так что

$$\text{ПРИРАЩЕНИЕ ЭНЕРГИИ ДВИЖЕНИЯ} = \text{ПРИРАЩЕНИЕ} \left(\frac{1}{2} Mv^2 \right).$$

Вот почему $\frac{1}{2} Mv^2$ мы называем *энергией движения*, или *кинетической энергией*.

Итак,

$$\text{КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ} = \frac{1}{2} Mv^2$$

Когда тело движется со скоростью v_0 , оно имеет кинетическую энергию $\frac{1}{2} Mv_0^2$. Когда же оно ускорится от скорости v_0 до ско-

¹⁾ Гл. 1 («Земное тяготение») входит в т. 1 настоящего издания.

рости v , то приобретает добавочную кинетическую энергию и будет иметь кинетическую энергию $\frac{1}{2}Mv^2$.

Попросту говоря, если масса M ускоряется из состояния покоя до скорости v , она приобретает кинетическую энергию $\frac{1}{2}Mv^2$.

Единицы измерения кинетической энергии

Поскольку при выводе выражения для кинетической энергии $\frac{1}{2}Mv^2$ мы использовали равенство $F=Ma$, то входящая сюда сила F должна выражаться в абсолютных единицах, т. е. в *ньютон*ах; тогда энергия тоже получится в абсолютных единицах, т. е. *ньютон·метр*.

Если же M выражается в *килограммах*, а v — в *м/сек*, то $\frac{1}{2}Mv^2$ выражается в *кг·м²/сек²*, или *ньютон·м*. Замена очевидного *кг (м/сек)²* для $\frac{1}{2}Mv^2$ на *ньютон·м* вполне оправдана, ибо благодаря

$$F = ma$$

$$1 \text{ ньютон} = 1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ м/сек}^2.$$

Наша единица энергии окажется при этом

$$\begin{aligned} 1 \text{ кг} \left(\frac{\text{м}}{\text{сек}} \right)^2 &= 1 \text{ кг} \left(\frac{\text{м}^2}{\text{сек}^2} \right) \\ &= 1 \text{ кг} \left(\frac{\text{м}}{\text{сек}^2} \right) \text{ м} \\ &= 1 \text{ ньютон} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

Как и следовало ожидать, кинетическая энергия измеряется в единицах *ньютон·м*, или *джоулях*.

Теплота

Теперь будем говорить о теплоте как о главной форме энергии, стоящей в едином ряду с потенциальной энергией силы тяжести, кинетической энергией и другими механическими формами энергии. Всего лишь век назад ее приняли в полноправные члены «энергетического братства», но, добившись признания, она потянула за собой и другие формы, такие, как химическая энергия и электрическая энергия. Идея сохранения энергии из узкой механической схемы быстро переросла в общий принцип.

Для подсчетов тепловой энергии мы должны предварить рассуждения гл. 29. Пусть теплота — это форма энергии, а

1 Калория = 4200 ньютон·м, или джоулей. Сама Калория ¹⁾ — обломок истории тепловых измерений в прошлом. Система измерения теплоты два века назад базировалась на представлении о том, что теплота сохраняется, никуда не пропадает, а только переходит из одного места в другое. Мы до сих пор пользуемся следующими правилами:

Для измерения количества тепла заставим его нагревать воду и умножим массу воды на приращение температуры. Если масса взята в кг, а разность Δ (температур) — в градусах Цельсия, то произведение их будет теплотой в Кал, или ккал.

Если теплота передается какому-то другому веществу, то сначала массу нужно помножить на повышение температуры, как и для воды, а результат затем помножить на «удельную теплоемкость» вещества.

Чтобы измерить теплоту, выделяемую определенным количеством топлива, необходим специальный прибор для сжигания образца и передачи образовавшегося тепла без заметных потерь воде. Подобным испытаниям были подвергнуты почти все виды топлива. Взвешенный образец, как правило, вместе со сжатым кислородом

Т а б л и ц а 1

«Топливо»	Теплота, выделяющаяся при полном сгорании 1 кг в кислороде, Кал/кг
Уголь	7 000—8 000
Нефть	10 000
Бензин	11 500
Водород (газ)	34 000
Спирт	6 500
Порох	Только 700
Торт или кекс	3 000—5 000
Хлеб	2 500
Сахар	4 000
Масло	8 000
Конфеты	3 000—8 000

¹⁾ В этой книге мы всюду будем пользоваться большой Калорией (Кал), или килокалорией (ккал), которая равна теплоте, необходимой для нагревания 1 кг воды на 1° С. Она в 1000 раз больше малой калории (кал), которая также иногда употребляется. Избегайте этой ошибки в 1000 раз!

помещался в толстую металлическую бомбу, которая погружалась в сосуд с водой. Затем с помощью электричества образец сжигали и измеряли возрастание температуры воды. Вместе с водой нагревалась и бомба со всем ее содержимым; это необходимо было учитывать. В табл. 1 приведены теплотворные способности некоторых видов топлива, одних при быстром, других при более спокойном, но зато более полном «сгорании» (в пищеварительной системе быстрое сгорание дает то же количество тепла).

Теплота и молекулы

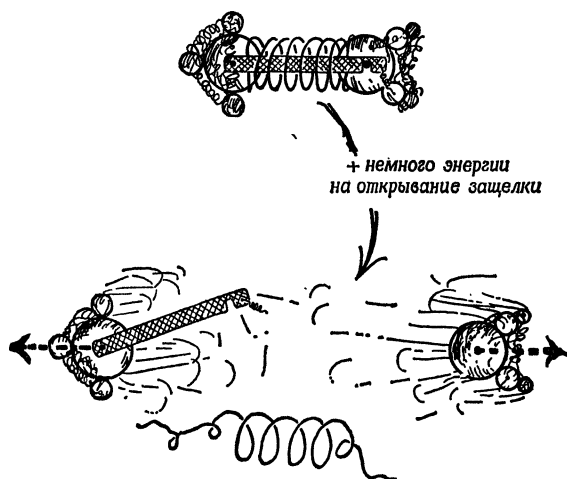
Любая удачная попытка передать энергию газу нагревает его, увеличивая (*давление*)·(*объем*). В кинетической теории мы связывали это с увеличением $\frac{1}{3} N(m\bar{v}^2)$, или $\frac{3}{2}$ кинетической энергии N хаотически движущихся молекул. Тепловая энергия газа — это просто кинетическая энергия в молекулярном масштабе. Мы считаем, что то же самое можно сказать как о жидких, так и о твердых телах с той лишь оговоркой, что необходимо учитывать кинетическую энергию вращения молекул и энергию их колебаний.

Представьте себе пулю, которая с огромной скоростью ударяется о препятствие и вследствие трения застревает в нем. В этом случае кинетическая энергия пули передается молекулам окружающего воздуха и дерева, сообщая им дополнительное движение. Огромная кинетическая энергия исчезает, а вместо нее появляется теплота. Если считать, что теплота — это «обобществленная» кинетическая энергия, то богатство, состоящее в огромном количестве упорядоченной кинетической энергии, распределяется среди всех хаотически движущихся молекул — «достойных» и «недостойных». Когда свинцовая пуля попадает в стенку, большая часть ее богатого запаса кинетической энергии превращается в энергию колебаний отдельных атомов свинца и стенки; энергия обученной армии вырождается в беспорядочную толчею толпы.

Химическая энергия

При сгорании порох превращается в горячие газы, которые в свою очередь сообщают пуле кинетическую энергию. Пуля в этом случае набирает упорядоченную кинетическую энергию за счет теплоты горячих газов (их «неорганизованной» кинетической энергии). Откуда же берут тепловую энергию сами молекулы? До этого взрыва порох был холодным твердым телом, содержащим запас «химической энергии». Энергия первичного топлива — угля, дров,

нефти — тоже химическая энергия. Это молекулярная энергия, запасенная, если угодно, в силовых полях атомов. Вообразите, что химическое соединение состоит из атомов, которые вопреки «пружинящим» межатомным силам посажены на свои места в молекуле и «защелка закрыта». Потенциальная энергия при этом запасается в сжатых пружинах (фиг. 48). Разумеется, химическая энергия — гораздо более сложная вещь, чем наша модель, но



Фиг. 48. Воображаемая картина молекулы взрывчатки.

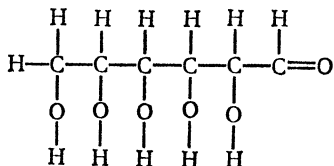
У реальной молекулы нет защелки, а вместо нее имеется другая пружина, уравнивающая сжатую пружину, но с другим законом сил. Однако даже в такой модели процесс горения груб и нереален.

общая картина ясна: атомы и молекулы запасают энергию, которая высвобождается при одних химических изменениях и запасается при других. Большая часть горючих веществ высвобождает свою энергию при горении в кислороде, так что энергия их связана с силовыми полями молекул топлива и кислорода. Трудно указать, где она расположена, но количество ее достаточно определено, ибо при переходе энергии в другие формы мы можем измерять работу, т. е. получить произведение *сила на расстояние*, например столько-то джоулей на каждый килограмм полностью сгоревшего топлива. Химическую энергию пороха или заряда фейерверочной ракеты локализовать легче. Вся она сидит там, внутри молекул горючего.

Пища — источник химической энергии

Пища — это топливо для людей и животных, она снабжает их химической энергией, которая переносится потоком крови к нуждающимся в ней мышцам. Мышцы могут преобразовывать часть получаемой энергии в механическую, поднимая грузы и т. п.

Пища содержит в основном атомы углерода, кислорода и водорода. Вот, например, молекула простейшего сахара, глюкозы $C_6H_{12}O_6$:



поддерживающей работу мышц. В процессе работы мышц и их отдыха молекулы этого топлива расщепляются пополам, затем отщепляется шесть молекул H_2O , а атомы углерода, соединяясь с атомами кислорода, поступающего из легких, дают шесть молекул CO_2 .

Это вкратце сильно упрощенная картина химии жизни¹⁾. Основные компоненты пищи — крахмал, сахара, жиры и белки — представляют большие молекулы, которые построены из меньших молекулярных структур, состоящих из атомов. Эти небольшие комплексы синтезируются растениями, связываются ими каким-то способом, образуя растительные вещества, такие, как углеводы и целлюлоза. Животные, поедая растительную или животную пищу, расщепляют эти вещества и перераспределяют их составляющие так, чтобы образовывались нужные большие молекулы. Однако сами животные не синтезируют их частей. Энергию, необходимую для движения и другой деятельности, они получают при дальнейшем расщеплении некоторых молекулярных комплексов на углекислый газ и воду. Эта энергия первоначально была «усвоена» растениями из солнечного света и запасена при синтезировании таких комплексов. Связывание и расщепление этих малых комплексов в пищеварительной системе животного — обычно дело нехитрое и не требует больших затрат энергии, оно быстро совершается микробами или ферментами. Большие молекулы в нашей пище содержатся в углеводах и целлюлозе, которые составлены из множества групп простых молекул сахара наподобие глюкозы, жиров с длинными цепями CH_2 и белков — еще больших по величине и очень сложных молекул, необходимых для строительства и обновления тканей. Процесс, посредством которого химическая энергия превращается в теплоту тела или работу мышц, — в сущности то же горение. При сгорании топлива в пламени происходит соединение его с кислородом с образованием воды и углекислого газа. Простейшее топливо нашего тела, такое, как глюкоза, соединяясь с кислородом, поступающим из легких, также образует воду и углекислый газ, но процесс идет гораздо медленнее и более хитрым путем, нежели простое горение в пламени; температура невелика, а энерговыделение то же самое.

¹⁾ Большая часть этого параграфа взята из прекрасной главы, посвященной биохимии в книге W. D a m p i e r, *Matter and Change*, Cambridge, 1924.



Фиг. 49. Схематическое изображение цикла.

Растения поглощают воду и CO_2 из воздуха, соединяют их и создают сахар, крахмал и целлюлозу — главные источники энергии животных.

Добывание животными горючего для мышц происходит примерно так: из пищи извлекаются простейшие молекулы сахара (точно так же, как и на химическом заводе извлекается спирт из древесной массы), которые запасаются в скоплениях, представляющих собой молекулы нерастворимого «животного» крахмала. Этот запас молекул крахмала расщепляется и по мере надобности поддерживает снабжение мышц сахаром. Когда мышцы сокращаются и производят работу, сахар в две стадии превращается в воду и углекислый газ. Из своей растительной пищи животные еще запасают жиры и «сжигают» их для согревания тела.

Затем то, что растрачивается человеком и животными, вновь воссоздается растениями, и опять все готово к употреблению. Как же растения делают это? Мы не можем «обратить» действие пламени и «возродить» сгоревшие вещества. Как же растения ухитряются проделявать такой «синтез жизни», сжимая пружинки межмолекулярных сил и закрывая защелки? Поскольку «открытие защелки» приводит к выделению химической энергии, растения должны вкладывать ее при создании агрегата. Им необходимо как снабжение энергией, так и устройство, которое использовало бы ее для синтеза молекул H_2O и CO_2 в молекулы сахара и крахмала. Солнечный свет снабжает их энергией — порциями световых волн, так сказать, в «расфасованном по пакетикам» виде, а все операции производятся такими «умными» молекулами растения, как зеленый хлорофилл. На солнечном свете зеленый лист растения поглощает CO_2 и создает крахмал. Таким образом, растительная и животная жизнь образует цикл, который начинается с *воды, углекислого газа и солнечного света* и заканчивается *водой, углекислотой, теплом и механической энергией животных*. Все наши машины, работающие на угле, нефти, ветре, падающей воде, все животные, потребляющие пищу, в конечном итоге получают свое топливо от Солнца.

Усталость

Все это вновь приводит нас к вопросу: почему мы устаем, когда просто держим на весу большой груз? По-видимому, потому, что от нас потребовалась затрата энергии, хотя это и не дало заметного прироста потенциальной энергии силы тяжести. Тщательные наблюдения показывают, что поддерживаемый груз не находится в полном покое. Груз колеблется то вверх, то вниз, и наши мышцы беспрестанно расслабляются и сокращаются. Если вы крепко стиснете зубы и закроете глаза, то можете услышать неясный гул такого дрожания мышц. На каждый такой крошечный подъем груза мышцы затрачивают химическую энергию. Но при последующем опускании потенциальная энергия силы тяжести уже не превращается в химическую — наша топливная машина необратима. Энергия переходит в тепло, которое мы растрчиваем попусту.

Другие формы молекулярной энергии

«Молекулярная энергия» наряду с химической включает энергию, связанную с процессами плавления твердых тел и испарения жидкости. Если твердое тело нагрето до точки плавления, то дальнейшее нагревание требует дополнительной затраты тепла, чтобы

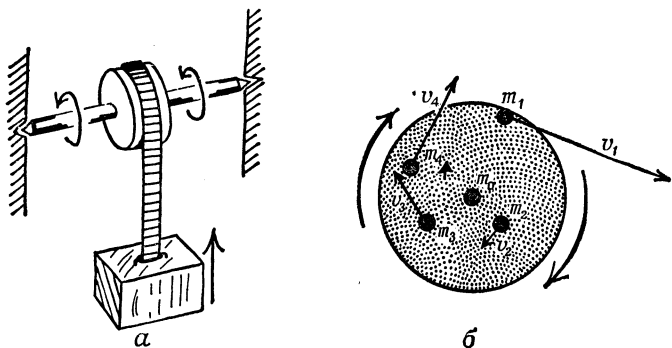
перевести молекулы из упорядоченной кристаллической структуры в хаотическую жидкую массу.

При испарении жидкости вылетающие быстрые молекулы уносят больше энергии, чем в среднем приходится на каждую молекулу. Чтобы поддержать кипение или предотвратить охлаждение при испарении, необходимо затратить дополнительное количество тепла. Это дополнительное тепло, затраченное на плавление и испарение, превращается в молекулярном силовом поле в своего рода молекулярную потенциальную энергию. Такое дополнительное количество тепла часто называется *скрытым*.

Поглощение скрытой теплоты не сопровождается нагреванием вещества — во время плавления и испарения температура остается постоянной. Но при обратном процессе, застывания или конденсации, скрытая теплота выделяется именно как *теплота* — ожог горячим паром гораздо тяжелее, чем кипятком.

Энергия вращения

Закрутим колесо, прикрепив к нему веревку с грузом. Колесо будет наматывать веревку и поднимать груз, замедляя из-за



Фиг. 50. Маховое колесо.

a — энергия вращения махового колеса может превращаться в потенциальную энергию груза, поднимаемого лентой, наматываемой на колесо; *б* — скорости различных частей махового колеса.

этого собственное вращение. Ясно, что вращающееся колесо затрачивает энергию на поднятие груза. Эту энергию мы называем *энергией вращения*.

Отдельные части вращающегося колеса движутся тем быстрее, чем дальше они от оси, и каждая из них обладает кинетической

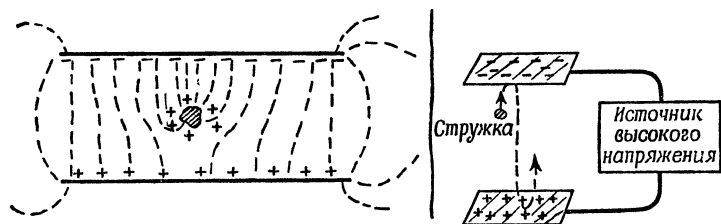
энергией. Если сложить $\frac{1}{2}mv^2$ всех маленьких частичек, можно получить полную энергию вращения. На самом деле энергия вращения — обычная кинетическая энергия, часть полной кинетической энергии (если тело одновременно с вращением движется). Но зачастую удобнее дать ей отдельное название.

Электрическая энергия

Для работы электрических батарей необходимы особые химические вещества, с которыми в процессе работы батарей происходят химические изменения. Высвобожденная химическая энергия не просто нагревает батареи, а превращается в электрическую энергию тока, который идет по электрической цепи и выделяется либо в виде тепла в электропечи, либо в виде механической энергии мотора, поднимающего грузы, либо даже снова в виде химической энергии при зарядке аккумулятора. Поэтому энергию, текущую из батарей, мы называем *электрической*.

Электродвигатели превращают механическую энергию в электрическую, а в электромоторах происходит обратный процесс.

Электрическая энергия может накапливаться. Батарея может перенести положительные и отрицательные заряды на пластины



Фиг. 51. Электрическая энергия.

Энергия, запасенная полем между двумя пластинами, может поднимать металлическую стружку.

конденсатора, который запасает энергию в своем электрическом поле. При разрядке конденсатора (искрой или через проводник) выделяется тепло. Это тепло свидетельствует о том, что в конденсаторе был запас энергии. Если вам нравится, то можете говорить, что запас энергии находился в электрическом поле между пластинами и вокруг них. Более прямая демонстрация перехода показана на фиг.51. Кусочек бумаги или металлическая стружка, помещенные между парой пластин, заряженных положительно и отрица-

тельно, также собирают на себе небольшой заряд и притягиваются электрическим полем. На верхней пластине заряд стружки становится противоположным и она движется вниз. В процессе движения вверх — вниз она расходует энергию на трение о воздух. Представьте теперь, что к листку приспособлена маленькая машина, которая работает на энергии, полученной от заряженных пластин и их поля.

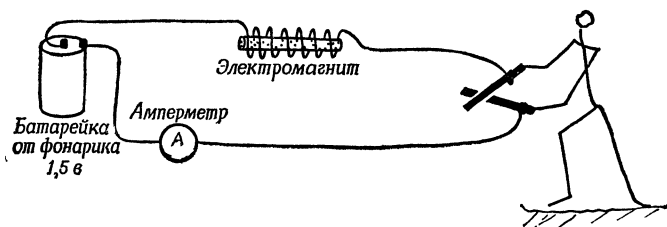
Когда по цепи течет электрический ток, мы говорим, что электрическая энергия переносится от батареи или генератора в различные участки цепи, где превращается в теплоту, механическую энергию и т. п. Генератор, вырабатывающий ток, должен потреблять механическую энергию, которая необходима для поддержания его вращения, иначе он вскоре растратит свою энергию вращения и остановится. Чем больший ток посылается в цепь, тем труднее крутить генератор, тем больше требует он механической энергии. Мы говорим, что в паровой машине тепловая энергия превращается в механическую энергию поршня и движущегося ремня. Генератор же превращает ее в электрическую энергию, которая идет по всей цепи, переходит в тепло и т. п. Электрическая энергия — вещь очень полезная, но сказать, где она находится, не так-то просто. Поэтому, когда вас спросят об этом, я думаю, лучше всего ответить — вокруг проводника, в электромагнитном поле, сопровождающем ток.

Магнитная энергия

Постоянные магниты, хотя и обладают запасом энергии, отдают ее весьма неохотно, так что нет нужды как-то специально называть эту энергию. Однако электрический ток создает вокруг себя протяженные, сильные магнитные поля. Как только ток выключается, магнитное поле исчезает, «сжимается», и в цепь выделяется значительное количество энергии не из батареи, а из магнитного поля. Это происходит в течение короткого периода времени «замирания» тока. Эту «магнитную» энергию, полученную из химической, вы почувствуете лучше, если во время демонстрации вас немного тряхнет током. На фиг. 52 показан такой эксперимент.

Экспериментатор замыкает цепь, соединяя два стержня, которые он держит в руках. Разводя стержни, он пытается разорвать цепь, но, поскольку при этом продолжает держать их в руках, цепь остается замкнутой через большое сопротивление тела. Когда стержни разведены, ток падает почти до нуля и магнитное поле электро-

магнита «сжимается», создавая при этом очень высокое напряжение, которое стремится поддерживать ток в цепи. В результате экспериментатор получает удар током.



Фиг. 52. Демонстрация проявления магнитной энергии.

Электромагнитная энергия

Во многих случаях электрическая и магнитная энергии тесно связаны друг с другом; каждую из них можно рассматривать как «оборотную сторону» другой. Переменные токи создаются переменными электрическими полями и образуют вокруг себя переменные магнитные поля. Во время радиопередачи в антенне создаются переменные токи, которые порождают электрические и магнитные поля, обладающие электрической и магнитной энергией, или, как мы предпочитаем говорить, электромагнитной энергией. Но эти поля не просто пульсируют около антенны. Часть их отрывается и улетает в виде электромагнитных волн ¹⁾, которые, двигаясь со скоростью света, уносят с собой электромагнитную энергию (см. гл. 33 и 37 ²⁾).

Таким образом, мы представляем себе радиоволны в виде движущихся полей, переносящих энергию. Когда они достигают принимающей антенны, то наводят в ней слабые переменные токи с электрическими и магнитными полями, которые в конечном итоге превращают большую часть энергии в слабый нагрев проводов приемника.

¹⁾ При всем своем волновом поведении они переносят энергию в виде компактных квантов, «частиц энергии» [см. гл. 44 («Современная физика»), входит в т. 3 настоящего издания].

²⁾ Гл. 33 («Электростатика») и гл. 37 («Магнитные силы») входят в т. 3 настоящего издания.

При поглощении света происходит нагревание, поэтому мы говорим, что свет тоже переносит энергию. Сейчас нам известно, что и невидимый свет — как инфракрасное излучение, так и ультрафиолетовые лучи — представляет собой потоки электромагнитных волн. Вместе с радиоволнами мы объединяем их под общим названием *излучение*. Излучение переносит энергию в форме энергии электромагнитной волны. Когда излучение поглощается, его энергия преобразуется в другие формы, чаще всего в теплоту.

Энергия волн

Океанские волны могут нести огромные энергии. Когда спокойная, ласково лижущая берег гладь превращается в штормовой океан, его волны способны крушить корабли, выбрасывать на берег огромные камни, выплескивать воду в высоко поднятые водоемы, создавая запас потенциальной энергии. Хотя в таких волнах вода и движется, каждая ее частичка не уходит слишком далеко. Она получает свое движение от соседних частиц и передает его следующей частице. Волны представляют примеры сложных и непрерывных взаимных переходов кинетической и потенциальной энергий, каждая из которых передается с характерной волновой скоростью. Источник энергии большинства океанских волн — это ветер, который гонит их. Ветер получает свою энергию от нагретой земли, а первоисточником всего является энергия излучения Солнца.

Звуковые волны, распространяющиеся в воздухе, также переносят энергию. Следующие друг за другом попеременные сжатия и разрежения слоев воздуха образуют звуковые волны и немного изменяют скорости молекул. Чередующиеся изменения кинетической энергии молекул воспринимаются нами как распространяющиеся волны. Эти изменения складываются в небольшой суммарный эффект, который и составляет энергию звуковых волн. Детали изменения энергии звуковых волн довольно сложны, и многое здесь вам придется принять на веру. Если кто-то в помещении громко крикнет, он сообщит воздуху слабое дополнительное движение, распространяющееся со скоростью звука. А когда крик замрет, его энергия превратится в нагревание стен комнаты, которые поглотили звук.

Электромагнитные волны, о которых мы только что говорили, переносят энергию во многом подобно волнам на воде или звуковым волнам. Их энергию называют *энергией излучения*, или просто *излучением*.

Кинетическая энергия волн на воде — это энергия движущейся воды, а потенциальная энергия — это энергия гребней, поднявшихся над впадинами. Кинетическая энергия звуковых волн — это упорядоченное движение слоев воздуха взад и вперед. Кроме того, они, эти слои, обладают еще потенциальной энергией, которая сходна с энергией деформации пружины, но на самом деле есть дополнительная кинетическая энергия *хаотического* движения молекул.

Ядерная энергия ¹⁾

Радиоактивные вещества (как естественные в урановой руде, так и искусственные, приготовленные из стабильных атомов с помощью так называемых ускорителей) беспрестанно выбрасывают ядерные снаряды — составные части атомов, которые летят с довольно значительной скоростью. Эти «снаряды» несут огромное по их масштабам количество кинетической энергии. Согласно сегодняшним представлениям о структуре атома, эти «снаряды» не могут возникнуть во внешних областях атомов — областях, где перестройка электронов обуславливает химическое изменение вещества. Они должны возникать в маленькой массивной сердцевине (ядре) радиоактивных атомов. Поэтому-то мы и думаем, что эта сердцевина несет огромный запас *ядерной энергии*. Часть этой энергии волею-неволею высвобождается при радиоактивных превращениях, но довольно долго считалось, что она не поддается вмешательству человека. Теперь же мы можем ускорить ее высвобождение, готовя нестабильные (радиоактивные) атомы.

В некоторых редких случаях ядра не выбрасывают маленькие снаряды, а сами *делятся* на две почти равные части. Такой «распад» высвобождает еще больше энергии и, кроме того, дает добавочные нейтроны, которые могут привести к делению соседних ядер, создавая таким образом возможность цепной реакции. Однако делиться способны лишь немногие тяжелые ядра.

¹⁾ Мы называем эту энергию *ядерной*, так как она, очевидно, локализована в сердцевине атома, в ядре. Однако бытует и старое название «атомная энергия»; существует, например, Комиссия по атомной энергии. С таким же правом и химическую энергию (которая высвобождается при изменениях внешней оболочки атома — его электронов) можно называть *атомной*. Дво-яким образом можно использовать и термин «молекулярная» энергия — для обозначения энергии молекулярного движения (теплоты) и для скрытой энергии плавления и испарения.

С другой стороны, при слиянии (синтезе) нескольких ядер легких атомов, таких, как водород, в одно более массивное ядро ¹⁾ выделяется энергия. Но трудность здесь в том, чтобы настолько плотно сжать ядра, чтобы вызвать этот процесс. Синтез ядер, по-видимому, совершенно невозможен при обычных температурах. Но при *очень* высоких температурах, скажем при звездных температурах, скорости атомов достаточно, чтобы начался термоядерный синтез, при котором выделяется огромное количество энергии, необходимое для поддержания температуры ²⁾. Доступный управляемый способ достаточно тесного сближения ядер позволил бы получить почти неисчерпаемый источник тепла. Мы уже научились управлять *делением*, но крайне невероятно, чтобы «топливные» запасы урана позволили нам в течение многих веков заменять уголь и нефть. Однако нам в конце концов, по-видимому, удастся овладеть и управляемой термоядерной реакцией.

Для чего нам нужна энергия

Предваряя экспериментальную проверку нашей веры в сохранение энергии, мы размахнулись на целый список различных ее форм.

Мы считаем энергию чем-то весьма нужным, способным работать на нас (скажем, поднимать грузы), тем, что измеряется *работой* (в кГм, или ньютон·м) или произведением *сила* на *расстояние* при переходе из одной формы в другую или с одного места в другое. Снабжение энергией необходимо для множества полезных дел:

- обогрева тел, домов и очагов, обеспечения передвижения;
- увеличения потенциальной энергии грузов на подъемниках;
- увеличения химической энергии при зарядке аккумуляторов и производстве химических удобрений;
- поддержания кинетической энергии работающих механизмов;
- освещения, приготовления пищи и т. д. и т. п.

Эти примеры применения можно разделить на три общие группы.

а) *Химическая энергия питания*. Как правило, она дороже энергии других видов топлива. Пшеница в перерасчете на калории гораздо дороже, чем уголь. Питание дает тепло для поддержания температуры тела, механическую

¹⁾ Пожалуй, не совсем уместно проводить параллель между ядерными изменениями, которые высвобождают «ядерную» энергию, и химическими изменениями, высвобождающими «молекулярную» энергию. Обычные виды топлива и взрывчатые вещества, в которых происходят химические превращения, дают по сравнению с ядерным делением и синтезом ядер гораздо меньшее выделение энергии. Существенно отличен и механизм этого процесса. Однако иллюстрировать разницу между делением и синтезом можно, назвав взрыв тринитротолуола случаем *химического деления*, а взрыв смеси кислорода с водородом с образованием воды — *химическим синтезом*.

²⁾ Эти реакции синтеза, протекающие в условиях очень высоких температур (миллионы градусов), обычно называют *термоядерными*. — *Прим. ред.*

Классификация форм энергии

Название	Обозначение	Где встречается
Потенциальная энергия силы тяжести (часто называется просто «потенциальная энергия»), или гравитационная потенциальная энергия	$E_{\text{пот}}$	При поднятии груза происходит возрастание потенциальной энергии, запасенной в поле силы тяжести
Энергия деформации (часто называется «потенциальная энергия»)	$E_{\text{деф}}$	При сгибании, растяжении, закручивании или сжатии пружины или другого упругого предмета последний запасает энергию деформации
Кинетическая энергия	$E_{\text{кин}}$	Энергия движения тела. Можно показать, что она равна $\frac{1}{2} (\text{масса}) \times (\text{скорость})^2$
Кинетическая энергия вращения	$E_{\text{вр}}$	Каждая часть вращающегося тела движется, следовательно, обладает кинетической энергией. Энергия вращения является суммой этих кинетических энергий
Тепловая энергия (теплота)	$E_{\text{тепл}}$	Теплота может переходить в кинетическую, потенциальную и другие формы энергии. Сейчас теплота рассматривается как энергия молекулярного движения
Химическая энергия или молекулярная энергия (ее следовало бы называть <i>атомной энергией</i>)	$E_{\text{хим}}$	Фейерверки, взрывы, продукты питания и топливо при химических превращениях могут выделять тепло и переходить в другие формы энергии. Мы говорим, что они содержат «химическую энергию»
Молекулярная энергия плавления и нагревания (скрытая теплота)	$E_{\text{скр.тепл}}$	На плавление и испарение требуется дополнительная теплота. Она не увеличивает температуры, а заключена в межмолекулярных полях
Электрическая энергия Магнитная энергия	$E_{\text{эл}}$ $E_{\text{маг}}$	Электрические цепи, заряженные конденсаторы, электромагниты связаны с электрической и магнитной энергиями

Название	Обозначение	Где встречается
Электромагнитная энергия	$E_{\text{эл-маг}}$	Энергия, свойственная тесно связанным друг с другом электрическим и магнитным полям
Энергия электромагнитных волн	$E_{\text{изл}}$	В электромагнитных волнах, т. е. движущихся электрических и магнитных полях. Она включает видимый свет, инфракрасные, ультрафиолетовые, рентгеновские лучи и радиоволны всех длин волн
Энергия излучения (включая и световую энергию)	$E_{\text{изл}}$	Излучение, включая свет и все другие электромагнитные волны
Волновая энергия (включая свет, звук и морские волны)	$E_{\text{волн}}; E_{\text{звук}}$	Волны переносят энергию (например, звук, свет, морские волны)
Ядерная энергия	$E_{\text{яд}}$	Высвобождается при ядерных превращениях: радиоактивности, делении и синтезе ядер

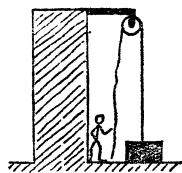
и химическую энергии для его движения, а иногда и механическую энергию наружу с некоторой растратой тепла, когда человек занимается физическим трудом.

б) *Тепло для обогрева жилищ и приготовления пищи.* Оно дает человеку возможность жить в различных климатических условиях и употреблять огромное разнообразие пищевых продуктов.

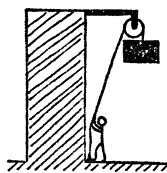
в) *Механическая энергия и тепло для транспорта, промышленности и т. д.* Все человечество нуждается в питании для поддержания жизни и в дополнительном питании для выполнения тяжелой физической работы. Современное общество заменяет тяжелый физический труд машинами, которые потребляют другие виды топлива. Оно увеличивает снабжение продуктами питания и расширяет жизненное пространство за рамки узких границ подходящего климата. По грубым данным в мире на душу населения сейчас приходится топлива (в пересчете на энергию) в 8 раз больше того, что обеспечивает питание. (Это отношение сильно меняется от малых величин в некоторых странах, где основную, но небольшую дополнительную энергию дают животные, до значительных цифр в передовых странах, где средняя механическая мощность, приходящаяся на каждого работающего на машинах, в 10—20 раз больше его собственной мощности.)

Несмотря на изыскание все новых источников топлива, потребление его ежегодно растет почти с той же скоростью, с какой растет население.

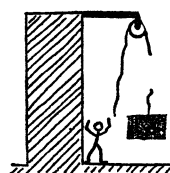
ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ



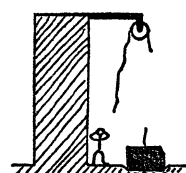
Химическая энергия



в потенциальную энергию
силы тяжести

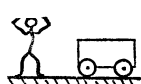


в кинетическую энергию



в теплоту

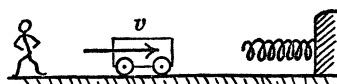
(через энергию деформации веревки)



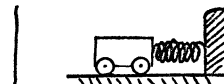
Химическая
энергия



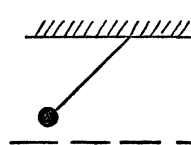
Ускорение
в кинетическую энергию



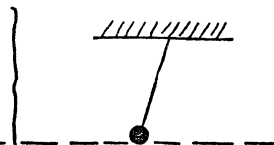
и кинетическая энергия



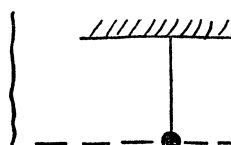
в энергию
деформации



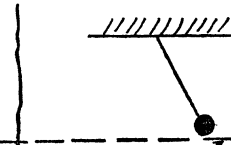
Потенциальная
энергия



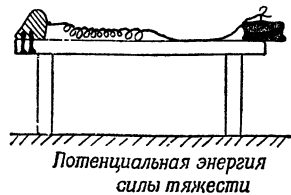
в кинетическую
+ потенциальную



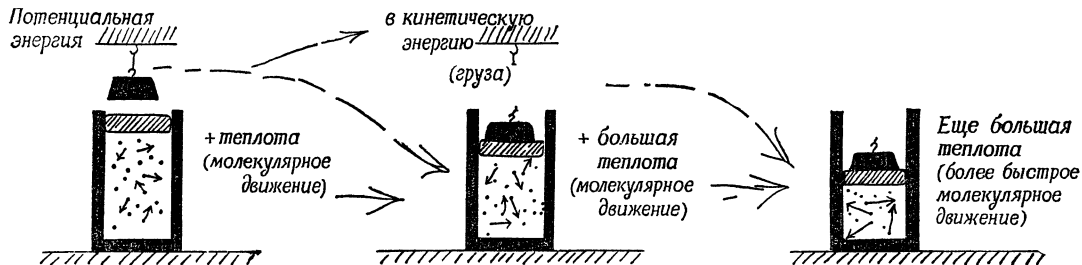
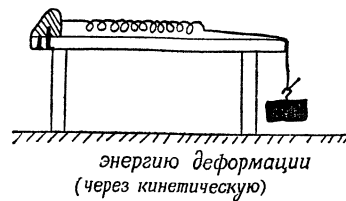
в кинетическую

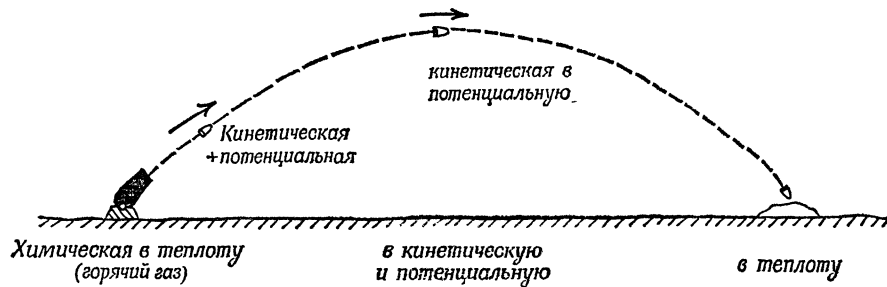
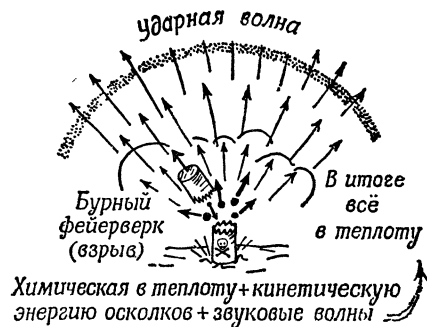


в потенциальную
и кинетическую
энергию

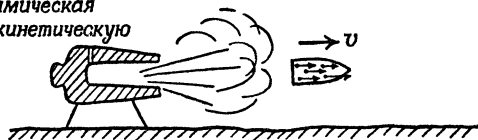


в

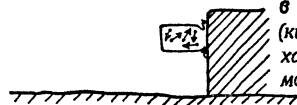




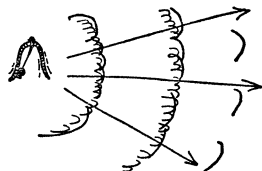
Химическая
в кинетическую



в теплоту
(кинетическая энергия
хаотического движения
молекул)



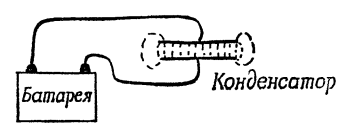
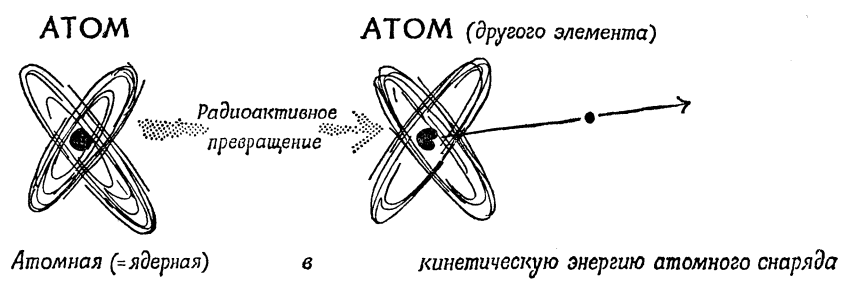
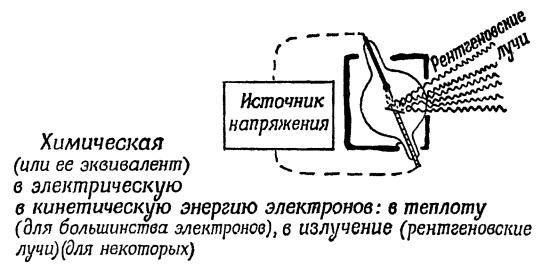
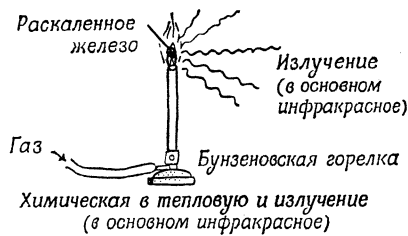
Химическая в энергию деформации, в звуковые волны,
в колебания, в теплоту



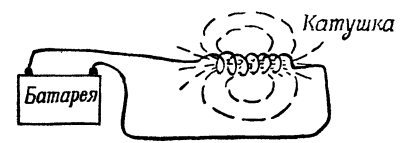
Энергия волн в потенциальную энергию
силы тяжести (поднятого корабля)

Химическая энергия переходит в теплоту воздуха и дороги.
Грузовик сохраняет постоянную кинетическую энергию
до тех пор, пока не встретит склон

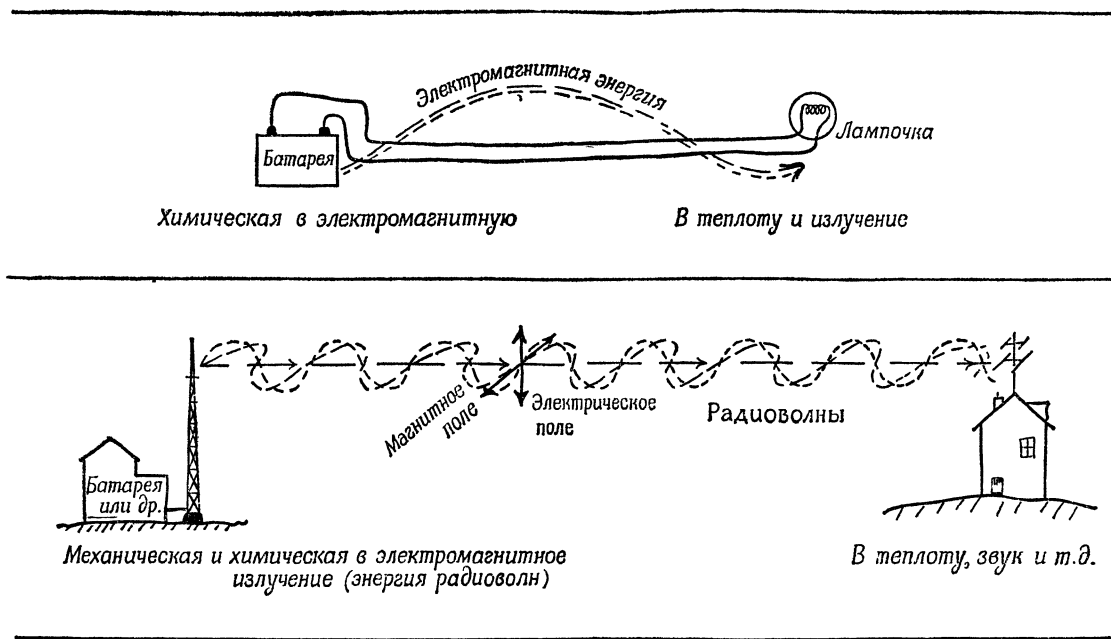




Химическая в электрическую



Химическая в магнитную



Фиг. 53.

Распределения потребляемой энергии за год в мире приводится в табл. 3¹⁾. Величина энергии дается в количестве угля в миллионах тонн, который при сгорании дал бы ту же энергию.

Т а б л и ц а 3

Годовое потребление топлива в мире

Форма топлива	Количество МТ *	Источник
Питание людей и корм рабочего скота	625	Солнечный свет (в настоящем)
Дрова	150	
Гидроэлектростанции	35	
Уголь, нефть, торф, естественный газ	2200	Солнечный свет (в прошлом)

* 1 МТ означает «1 миллион тонн эквивалента угля» (около 8 000 000 000 кет.час).

Большинство энергии, потребляемой человеком, превращается в бесполезное тепло. Часть потерь неизбежна. Вот что нам удастся извлечь:

Годовое потребление энергии

а) *Питание.* Ежегодно на земле 250 МТ идет на питание людей, из коих около 25 МТ превращается в полезный труд (который можно заменить лошадьми, машинами или моторами).

б) *Полезная теплота, расходуемая на бытовые нужды:* 100 МТ.

в) *Теплота и механическая энергия для транспорта и промышленности:* 350 МТ (+25 МТ от людей).

Из годового потребления, составляющего 3000 МТ, используется 700 МТ. Остальное растрчивается в виде теплоты. Но мы едва ли можем похвастаться эффективностью 700/3000, ибо не учли падающее на Землю солнечное излучение, почти полностью переходящее в теплоту, а это свыше 10 000 000 МТ в год.

¹⁾ Среди экспертов существует расхождение в подсчете мировых расходов энергии частично из-за отсутствия значительного количества информации, о которой приходится только догадываться, а частично из-за различных методов учета. Например, нужно ли учитывать в качестве топлива продукты животноводства или это двойной учет корма? Приведенные здесь соображения взяты из брошюр, изданных ЮНЕСКО, — «Энергия на службе человека» № 1 А. Эгертона и № 6 Ф. Симона (UNESCO, Paris, NS 74 и 79, 1951). Данные относятся к 1937 г. С тех пор ежегодное мировое потребление нефти, газа, энергии воды более чем удвоилось.

Возможность получения энергии: кинетическая энергия упорядоченного и хаотического движения

При любых обсуждениях вопросов, связанных с использованием энергии, необходимо отличать теплоту, т. е. энергию хаотического движения, от энергии упорядоченного движения, известной в технике как свободная энергия. Так, кинетическая энергия летящей пули представляет собой энергию упорядоченного движения — она вся заключена в пуле. Мы называем ее свободной энергией, ибо ее целиком можно превратить в потенциальную энергию; для этого надо просто выстрелить вертикально вверх! Энергия деформации также упорядочена, и мы называем ее тоже свободной энергией, ибо пружина может затратить ее на поднятие груза. Химическая энергия практически вся свободна, как и электрическая энергия и энергия высокотемпературного излучения. Любая из этих форм энергии позволяет использовать *всю* энергию. Хаотическая энергия тепла имеет один существенный недостаток. *На какие бы хитрости мы ни шли, в механическую энергию способна превратиться лишь часть тепловой.*

Это происходит из-за того, что даже в лучшей из мыслимых машин для превращения теплоты в механическую энергию некоторая доля теплоты передается холодильнику. Иначе машина не сможет повторить рабочий цикл. Мы не в силах полностью упорядочить случайное движение молекул, превратив его энергию в свободную. Некий хаос всегда останется. Мысленный эксперимент с *идеальной* тепловой машиной говорит, что максимальная доля тепла, которую можно использовать, составляет $(T_1 - T_2)/T_1$, где T_1 — абсолютная температура «нагревателя», или котла, а T_2 — абсолютная температура холодильника машины (о смысле абсолютной температуры см. гл. 27). Так, пар под высоким давлением с температурой 500° K (227° C), превращающийся в воду с температурой 300° K (27° C), может дать к. п. д. не больше $(500 - 300)/500$, или 40%. Такая паровая машина *должна* выбрасывать, помимо реальных потерь, 60% своего тепла.

Максимальный к. п. д. равен $(T_1 - T_2)/T_1$, или $1 - (T_2/T_1)$. Так что чем выше T_1 (или чем меньше T_2), тем ближе к. п. д. к единице. Чтобы уменьшить затраты, силовые установки стараются делать с возможно большей температурой T_1 нагревателя, или котла. Серьезные ограничения возникают из-за масла, которое начинает гореть, и металла, который начинает плавиться. Температуру же T_2 при постоянном подводе тепла нельзя сделать ниже температуры окружающей среды. Практически у нас нет способа *непосредственно* использовать химическую (или ядерную) энергию. Мы должны сначала превращать ее в теплоту, а уж после этого нам не избежать больших тепловых потерь.

Как это ни парадоксально, но такие же рассуждения, основанные на мысленных экспериментах, говорят, что когда возникает другая потребность — получить теплоту из свободной энергии, т. е. когда мы хотим обогревать квартиру электричеством, мы можем достичь высокой эффективности (к. п. д.).

Используя свободную энергию, мы с помощью небольшой машины можем «перекачивать» теплоту с холодной улицы в теплую комнату. В сущности, такой тепловой помпой может служить вывернутый наизнанку холодильник, морозильное отделение которого помещено вне комнаты. Сейчас этим начинают пользоваться, и это обещает дать большую экономию топлива.

Беспорядок, информация, энтропия

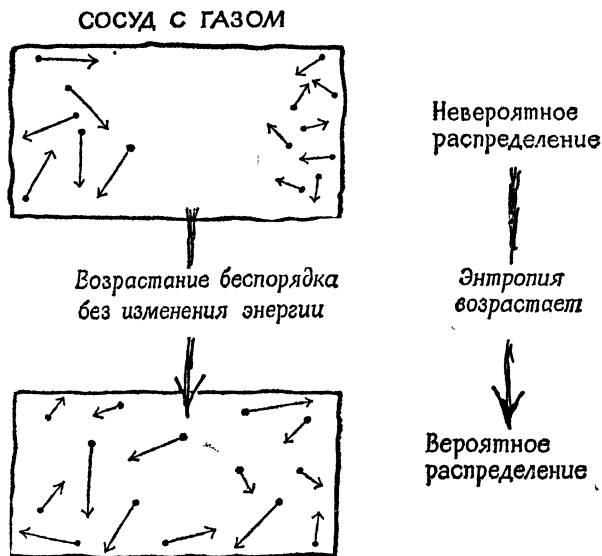
Используя солнечный свет, уголь или гидроресурсы для получения полезной работы типа питания электроламп, привода токарного станка или перекачивания воды на вершину холма и т. д., мы вновь и вновь приходим к *теплоте* как к почти неизбежному побочному (вследствие трения) и наиболее вероятному конечному продукту. Когда свет лампы поглощается стенами, станок режет металл или вода стекает назад в океан, полученная первоначально из топлива энергия в конце концов целиком превращается в теплоту. А если мы и вначале имели дело с теплотой, то на конечном этапе будет более низкая температура. Она практически не пригодна для дальнейшего использования. Можно, конечно, придумать и другой конец — позволить свету излучаться в межзвездное пространство, станку закручивать пружину, а воду оставить на вершине холма, но, как правило, конечный продукт все-таки теплота. (Вся энергия от сгорания бензина во всех автомобилях мира за прошлый год перешла в конечном счете в нагревание воздуха и земли.) Такой переход в теплоту с низкой температурой означает увеличение беспорядка в движении молекул. Даже когда теплота сохраняется, например при смешивании горячего и холодного воздуха, беспорядок все равно возрастает: (*группа быстрых молекул в одной области*) + (*группа медленных в другой*) превращается в (*смесь молекул с промежуточным хаотическим движением*). Рассмотрение как простого смешивания горячего и холодного газа, так и общетеоретическое изучение тепловых машин (термодинамики) приводит нас к выводу, что естественной тенденцией является увеличение беспорядка с течением времени. Это придаст времени важное свойство — направленность в случае статистических процессов. В простой механике, выраженной в законах Ньютона, время может течь в обоих направлениях. Кинофильм о соударении двух молекул будет выглядеть одинаково правдоподобно, как бы мы ни запустили пленку — с начала или с конца. Но фильм, в котором молекулы горячего газа смешиваются с холодными, выглядит дико, если его запустить с конца. Таким образом, столкновения мирада молекул указывают на направления течения времени в нашем мире. Изобретена физическая мера «беспорядка», названная «энтропией». Говорят, «энтропия Вселенной стремится возрасти». Отсюда возникла мысль о «тепловой смерти» Вселенной¹⁾, когда все будет находиться при одной и той же низкой температуре и максимальном беспорядке вещества и излучения.

Энтропию можно определить как отношение количества *тепла к абсолютной температуре*, или как вероятность определенной конфигурации в мире молекул. Дальнейшие детали этого определения и его использования увели бы нас слишком далеко за рамки нашего курса, но наблюдайте за этим понятием в науке последующего полустолетия. «Будущее принадлежит тем, — сказал Фредерик Кеффер, — кто сможет управлять энтропией... Промышлен-

¹⁾ Как была пущена в ход вся эта гигантская машина — Вселенная? Будет ли она замедляться или через какие-то длинные промежутки времени произойдет таинственный «подзавод»? Это не нарушило бы закона сохранения энергии, но нарушило бы закон возрастания энтропии, который, по-видимому, тоже справедлив. А может быть, происходит какой-то непрерывный процесс создания вещества, который пополняет запас доступной энергии? Впрочем, это скорее предмет философии, к тому же астрономия и ядерная физика смогут, по-видимому, в будущем прояснить некоторые из относящихся сюда вопросов.

ные революции прошлого затрагивали только потребление энергии, но заводы-автоматы будущего — это революции энтропии».

Молекулы газа в процессе соударений в принципе могли бы рассортироваться на быстрые (горячие) в одной части сосуда и медленные (холодные) — в другой. Это означало бы *уменьшение беспорядка* в противоположность тому, что предсказывает закон возрастания энтропии. Но такое случайное событие почти невероятно — не невозможно, а просто крайне маловероятно. Наиболее вероятно беспорядочное расположение и скорости молекул, так что



Фиг. 54.

упорядоченное расположение после нескольких соударений с большой вероятностью вновь становится хаотическим. Возникновение порядка очень маловероятно даже на протяжении очень долгого времени. Возникновение порядка крайне маловероятно..., беспорядка — очень вероятно, вот почему энтропию можно определить тремя эквивалентными способами: 1) как меру беспорядка; 2) через теплоту и температуру; 3) через вероятности конфигураций молекул (насколько они статистически вероятны).

Второй закон термодинамики по сути дела гласит: энтропия стремится возрастать. Из-за неизбежных процессов, таких, как потери тепла, трение, неупругие соударения..., она увеличивается. Максимум, на что мы можем надеяться в случае непрерывно работающей совершенной тепловой машины, — это сохранение энтропии постоянной.

Энтропия очень важна для расчетов работы тепловых машин, где мы стремимся использовать все доступное тепло ¹⁾. Она, по-видимому, очень важна и для биологических объектов, для которых господствует одно направление времени.

В последнее время представлением об энтропии воспользовались в «теории информации», которая лежит в основе проектирования систем связи, ЭВМ и т. п. Допустим, что вы ухитрились наблюдать за движением отдельной молекулы газа и можете записать движение каждой из них. За этой детальной информацией вы не разглядите газа как однородной системы, находящейся в состоянии максимального хаоса, а увидите лишь, что движение крайне нерегулярно. *Получая информацию, вы уменьшаете энтропию газа.* Таким образом, информация, переданная по телефону в виде сообщения или от термометра к термостату, напоминает *отрицательную энтропию*. Эта аналогия эффективно помогает при кодировании множества одновременных телефонных переговоров, создании усилителей, улучшении качества звукозаписывающих устройств, конструировании автоматов и при изучении нашей собственной нервной системы, языка, памяти, а быть может, и «разума».

Источники энергии

Когда мы ищем источники энергии, то имеем в виду запасы, пригодные для использования, а не какого-то «таинственного кредитора». Нефть, уголь, бензин, горючий газ — все содержит запас химической энергии, которая может быть превращена в теплоту и другие полезные формы при сжигании этих веществ в кислороде ²⁾. Они образовались из растений, которые росли под солнцем сотни миллионов лет назад. Для роста деревьев и хлеба

¹⁾ Предположим, имеется тепловая машина, которая отбирает тепловую энергию H_1 из нагревателя и отдает тепловую энергию H_2 охлажденному конденсору. При этом из нагревателя в машину поступает энтропия H_1/T_1 , а в конденсор уходит энтропия H_2/T_2 . В лучшем случае $H_1/T_1 - H_2/T_2 = 0$ или $H_1/T_1 = H_2/T_2$. Но тогда мы можем вычислить эффективность машины:

$$\begin{aligned} \text{ЭФФЕКТИВНОСТЬ} &= \frac{\text{ТЕПЛОТА, ПРЕВРАЩЕННАЯ В МЕХАНИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ } H_1 - H_2}{\text{ТЕПЛОТА, ВЗЯТАЯ ИЗ НАГРЕВАТЕЛЯ } H_1} \\ &= \frac{H_1 - H_2}{H_1} = 1 - \frac{H_2}{H_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \end{aligned}$$

Итак, если изменение энтропии равно нулю, то

$$\text{ЭФФЕКТИВНОСТЬ} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Это для идеальной машины. В любой реальной машине энтропия с каждым циклом возрастает за счет того, что она отдает большую теплоту H_2 , поэтому эффективность ее должна быть меньше.

²⁾ Точнее, мы должны говорить, что запасом химической энергии обладают топливо + кислород. Реализуется же она в результате обмена электронами в процессе сгорания.

необходим солнечный свет. Из него черпают свою химическую энергию растения. От Солнца получили свою энергию и водяные колеса и ветряные мельницы, вырабатывающие механическую энергию, которую можно превратить в электричество и другие полезные формы энергии. Ветры возникают при неодинаковом нагреве Земли Солнцем, а вода, отдающая при падении потенциальную энергию силы тяжести, получает ее при испарении озер и океанов под действием солнечного света и ветра. Все энергоснабжение идет от Солнца. Почти все источники энергии создает для нас солнечное излучение.

Существуют и другие источники, такие, как вулканическое тепло, приливное действие Луны и ядерная энергия, но в настоящее время их использование развито относительно слабо, и только применение ядерной энергии обещает в будущем возрасти. Управляемая реакция деления, топливом для которой служит уран, уже используется для движения подводных лодок и обогрева домов. Имеются интересные установки, которые воспроизводят атомы изотопов, способных к распаду. В будущем мы сможем придумать экономичные методы извлечения урана из бедных руд, что обеспечит человечество энергией на несколько веков.

Таким образом, очевидно, что наше ближайшее будущее достаточно обеспечено тремя сортами топлива: солнечным светом, столь необходимым для создания продуктов питания, запасами солнечного света в угле и нефти и ядерной энергией. Угля пока еще очень много. Новые запасы нефти обнаруживаются быстрее, чем иссякают старые, хотя несколько десятилетий назад эксперты твердили, что «нефти хватит, чтобы протянуть только десяток-другой лет». Геологи находят новые залежи урана и тория. Однако при нынешнем росте населения ни один из этих источников не продержится более нескольких десятков веков. Заглядывая же на тысячу и более лет в будущее, когда человечество «растратит свои старые капиталы», мы понимаем, что поток солнечного излучения способен ограничить рост благосостояния человечества, если, конечно, не осуществляются наши надежды на почти безграничную энергию от синтеза легких элементов.

Можно пофантазировать и относительно источника энергии самого Солнца. По-видимому, это ядерный синтез. Во внутренней топке ¹⁾ Солнца атомы водорода, соединяясь, образуют атомы гелия (возможно, в циклическом процессе с участием других проме-

¹⁾ «Есть только один атомный реактор необычайной мощности, но на безопасном расстоянии. Он доступен всем, и имя ему — Солнце!» Ф. Симон (UNESCO, Paris, NS 79, 1951).

жуточных ядер). Синтез гелия дает достаточно теплоты, чтобы поддерживать за ее счет гигантское излучение. К счастью, запас водорода в Солнце достаточно велик. Если бы Солнце было обычным огненным шаром из раскаленного добела угля с достаточным количеством кислорода, оно бы сгорело дотла за несколько тысяч лет. Как мы покажем позднее, излучение обладает массой, поэтому Солнце должно терять массу со скоростью около 300 000 000 000 тонн в день или более того. Но масса Солнца превышает 2 000 000 000 000 000 000 000 000 тонн и его хватит еще надолго.

Примеры вычисления энергии. Вычисление потенциальной энергии

Пользуясь работой, равной произведению *сила на расстояние*, мы легко можем подсчитать изменение потенциальной энергии. При поднятии груза прирост его потенциальной энергии равен *весу*, т. е. притяжению Земли, умноженному на *высоту* подъема. Если тело движется по наклонному пути, мы пользуемся также произведением *вес на высоту* подъема по вертикали. Земля не тянет груз вбок, так что боковое движение не требует совершения работы. Если при движении колес по шероховатой дороге или подъеме по лестнице сказывается трение, то какая-то работа совершается и при горизонтальном движении; при этом энергия переходит в нагревание дороги, обода и ботинок. Поскольку эта теплота не запасается и не может быть использована на обратном пути, мы не можем считать ее потенциальной энергией. Поэтому при вычислении *полезной* потенциальной энергии, того запаса энергии, который можно использовать для движения механизмов, мы не учитываем горизонтального движения (нулевой уровень потенциальной энергии см. стр. 426).

Пример А. *Вычисление прироста потенциальной энергии*

1. Мешок с зерном весом 20 $\kappa\Gamma$ поднят с пола на высоту 10 м

$$\begin{aligned}\text{ПРИРОСТ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ} &= \text{ВЕС} \cdot \Delta \text{ ВЫСОТЫ} \\ &= (20 \kappa\Gamma) \cdot (10) \text{ м} \\ &= 200 \kappa\Gamma\text{м}.\end{aligned}$$

Если мы хотим выразить этот прирост в «хороших» единицах, которыми нужно пользоваться во всех случаях, когда есть движение, то вес также необходимо выражать в таких «хороших» единицах, как *ньютон*. Таким образом,

$$\text{ВЕС} = \text{ПРИТЯЖЕНИЕ ЗЕМЛЕЙ} \ 20 \kappa\Gamma$$

$$\begin{aligned}&= (20 \kappa\Gamma) \cdot (9,8 \text{ ньютон}/\kappa\Gamma) \\ &= (20) \cdot (9,8) \text{ ньютон} = 196 \text{ ньютон}.\end{aligned}$$

$$\text{ПРИРОСТ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ} = \text{ВЕС} \cdot \Delta \text{ ВЫСОТЫ}$$

$$\begin{aligned}&= (20) \cdot (9,8 \text{ ньютон}) \cdot (10 \text{ м}) \\ &= 1960 \text{ ньютон} \cdot \text{м} = 1960 \text{ дж}.\end{aligned}$$

2. Груз массой 20 кг поднят на высоту 10 м по кривому пути при помощи блоков и веревок.

Прирост потенциальной энергии силы тяжести по-прежнему составит $(196 \text{ ньютон}) \cdot (10 \text{ м})$. Это и есть та потенциальная энергия, которую потерял бы груз, если бы он упал вертикально на пол. Именно она и приобретается при поднятии груза на 10 м независимо от того, насколько

груз продвинулся бы вбок. Проверим это на следующем простом примере. Предположим, что груз втаскивается наверх по наклонной плоскости, причем на пути длиной 50 м он поднимается на высоту 10 м. В этом случае нам известна сила, с которой нужно тащить груз вдоль плоскости без трения. Она задается отношением

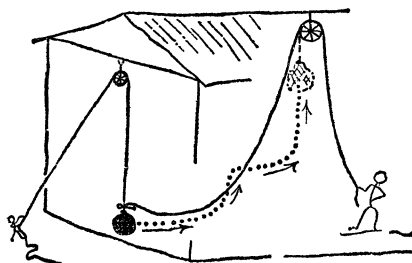
$$\frac{\text{СИЛА } F}{\text{ВЕС } W} = \frac{\text{ВЫСОТА ПОДЪЕМА}}{\text{ДЛИНА ПЛОСКОСТИ}},$$

$$\frac{F}{196 \text{ ньютон}} = \frac{10}{50}, \quad F = \frac{196}{5} = 39,2 \text{ ньютон}.$$

Но человек тянет груз с силой 196/5 ньютон вместо полных 196 и должен тащить его 50 м, а не 10 м (или если он стоит на вершине, то должен вытянуть 50 м веревки вместо 10). Следовательно, его затраты энергии, измеряемые произведением силы на расстояние, равны $(196/5 \text{ ньютон}) \cdot (50 \text{ м}) = 1960 \text{ ньютон} \cdot \text{м}$, т. е. такие же, как и прежде.

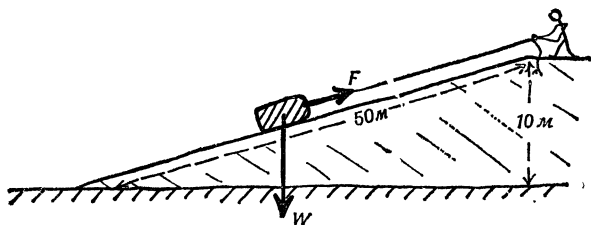
При наличии трения человек должен прикладывать большую силу, чем 39,2 ньютон, однако она не имеет ничего общего с приростом потенциальной энергии. Дополнительная сила используется для преодоления трения, причем дополнительная энергия расходуется на теплоту, не увеличивая потенциальной энергии груза.

3. *Растяжение пружины.* В этом случае сила непрерывно возрастает. Нам необходимо брать подходящую среднюю силу. Лучше всего взять натяжение пружины в начале и в конце и усреднить эти значения¹⁾.

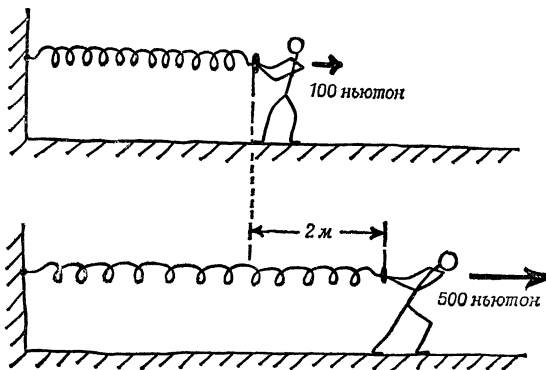


Фиг. 55.

Фиг. 56.



¹⁾ Такое усреднение, т. е. $\frac{1}{2}$ (начальная сила + конечная сила), справедливо только для пружин, которые подчиняются закону Гука. Это можно проверить либо геометрическими рассуждениями, паподобие галилеева рассмотрения ускоренного движения, либо следующими расчетами. Закон Гука гласит: (напряжение F) = k (растяжение x). При растяжении от ну-



Фиг. 57.

Пусть человек, удерживающий пружину с напряжением 100 ньютонов, растянул ее на 2 м, причем напряжение возросло до 500 ньютонов, тогда

$$\begin{aligned}
 \text{ПРИРОСТ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ПРУЖИНЫ} &= \text{СРЕДНЯЯ СИЛА} \cdot \text{РАССТОЯНИЕ}, \\
 &= \frac{(100 \text{ ньютонов} + 500 \text{ ньютонов})}{2} \cdot 2 \text{ м}, \\
 &= 300 \cdot 2 \text{ ньютонов} \cdot \text{м} \\
 &= 600 \text{ Дж}.
 \end{aligned}$$

Замечание о нулевом уровне потенциальной энергии

Прирост потенциальной энергии силы тяжести определяется произведением *вес на высоту подъема*. Чтобы вычислить *полную* потенциальную энергию силы тяжести предмета, мы должны знать его «полную высоту», а это, по-видимому, не имеет смысла. От чего отсчитывать эту высоту — от поверхности Земли, от ее центра, а может быть, от стола? *Ответ*: абсолютного нулевого уровня потенциальной энергии в обычных расчетах нет. К счастью, мы пользуемся только *изменением* потенциальной энергии, а поэтому можем выбирать любой удобный для нас нулевой уровень. Если мы возьмем на берегу камень и поднимем его на вершину утеса, то в качестве нулевого уровня можно взять уровень морского берега и приписать камню на берегу нулевую потенциальную энергию. Если мы сбросили камень с воздушного шара на

для до x_1 прирост потенциальной энергии пружины равен

$$\int_0^{x_1} F dx = \int_0^{x_1} kx dx = \frac{1}{2} kx_1^2 = \frac{1}{2} (kx_1)x_1 = \frac{1}{2} F_1 x_1.$$

При растяжении от x_1 до x_2 прирост потенциальной энергии равен

$$\frac{1}{2} kx_2^2 - \frac{1}{2} kx_1^2 = \frac{1}{2} (kx_2 + kx_1)(x_2 - x_1) = \frac{F_2 + F_1}{2} (x_2 - x_1).$$

Землю, то нулевым уровнем будет поверхность Земли. Если же бросить камень в колодец, то в качестве нулевого уровня лучше выбрать *либо* дно колодца, *либо* уровень Земли, и когда камень находится ниже уровня Земли, воспользоваться странной на первый взгляд отрицательной потенциальной энергией. Если мы ставим опыт над лабораторным столом, то в качестве нулевого уровня можно выбирать *либо* поверхность стола, *либо* пол. В последнем случае все высоты будут больше, но *разность* высот останется, конечно, той же самой.

Поднимая предмет все выше и выше, мы, очевидно, сообщаем ему все большую потенциальную энергию. Непосредственно над земной поверхностью каждый килограмм при подъеме на 1 м приобретает 9,8 дж, но когда мы поднимаем его на большую высоту, то должны учитывать изменение силы земной притяжения согласно закону обратных квадратов. На высоте 6000 км килограмм приобретает при подъеме на 1 м в 4 раза меньшую энергию, т.е. 2,45 дж. Из-за уменьшения земного притяжения потенциальная энергия тела на большой высоте возрастает все медленнее и медленнее. Используя закон обратных квадратов и интегральное исчисление ¹⁾, мы найдем, что на очень больших расстояниях (на «бесконечности», если угодно) потенциальная энергия приближается к пределу, который оказывается равным той энергии, которую имеет тело, поднятое на высоту радиуса Земли, при условии, что вес тела остается тем же, что и на поверхности.

Для 1 кг это означает прирост в 9,8 ньютонов · 6 400 000 м, или 63 000 000 дж. Если в качестве нулевого уровня принять значение потенциальной энергии на «бесконечности», то каждый килограмм на Земле будет иметь отрицательную потенциальную энергию, равную 63 000 000 дж. Для обычных лабораторных работ такое число слишком громоздко и бесполезно. Но оно говорит, сколько энергии мы должны сообщить телу, чтобы оторвать его от Земли. Для выбрасывания за «пределы» Земли ракеты или молекулы газа, с тем чтобы они никогда не вернулись назад, мы должны сообщить каждому килограмму более 63 000 000 дж кинетической энергии.

Такова плата за потенциальную энергию. В этом суть «второй космической скорости». С какой скоростью должна двигаться масса M кг, чтобы обладать кинетической энергией 63 000 000 дж и заплатить за свое «избавление»?

Отрицательная потенциальная энергия подобного рода встречается и в простейших атомных моделях наподобие модели Бора. В электрическом поле притяжения атома электрон обладает отрицательной потенциальной энергией, если ее отсчитывать от нуля, когда электрон удален от атома «на бесконечность». Если электрон с «внешнего» уровня переходит на «внутренний», электрическое поле теряет часть своего запаса энергии: потенциальная энергия уменьшается, *величина отрицательной потенциальной энергии становится больше.*

¹⁾ Увеличение потенциальной энергии при подъеме от поверхности Земли с радиусом R до бесконечности равно

$$\begin{aligned} \int_{r=R}^{r=\infty} G \frac{Mm}{r^2} dr &= GMm \int_R^{\infty} \frac{dr}{r^2} \\ &= G \frac{Mm}{R} = G \frac{Mm}{R^2} R \\ &= mgR = \text{Вес} \cdot R. \end{aligned}$$

Выделенной поем энергии оказывается больше, чем это нужно электрону для увеличения кинетической энергии на «маленькой» орбите, и разницу в энергии атом испускает в виде излучения.

Пример Б. Расчеты с тепловой энергией

При расчетах превращения тепловой энергии в механическую и т. д. мы должны для обеих форм пользоваться одной и той же единицей измерения. Опыты, описанные в следующей главе, показали, что $1 \text{ Кал} \approx 4200 \text{ дж}$.

Автомобиль массой 1500 кг проехал 2 км со скоростью 50 км/час и сжег $\frac{1}{5}$ л бензина.

а) Сколько тепла выделилось при сгорании этого бензина?

б) Какой доле среднего дневного рациона человека с нормальным питанием соответствует такое количество энергии (пусть его рацион составляет 3300 Кал в день)?

в) Сделайте грубую оценку замедления автомобиля и оцените полное «сопротивление» вследствие трения дороги и сопротивления воздуха на скорости 50 км/час. Вычислите энергию, необходимую для преодоления этого сопротивления на расстоянии 2 км (т. е. энергию в химической форме, превратившуюся в теплоту дороги и воздуха благодаря движению автомобиля, без учета теплоты, затраченной на прямое нагревание воздуха мотором).

г) Какая доля тепла, выделенного сгоревшим бензином, пошла на энергию, необходимую для движения автомобиля?

Ответы

а) Плотность бензина составляет 0,74 плотности воды, а масса 1 л воды 1 кг. Следовательно, масса 1 л бензина 0,74 кг, а масса $\frac{1}{5}$ л бензина 0,15 кг.

$$\begin{aligned} \text{Тепловыделение} &= 0,15 \cdot 11\,000 \text{ Кал/кг} \\ &\approx 1600 \text{ Кал.} \end{aligned}$$

б) Эта энергия составляет 1600/3300 энергии среднего дневного рациона питания, т. е. примерно $\frac{1}{2}$, так что 2 км езды на автомобиле берут из мирового запаса энергии столько же, сколько хороший обед.

в) Чтобы вычислить произведение сила на расстояние для перехода энергии при движении, нам нужно оценить силу F . Вот запись реального опыта с машиной. Автомобиль ехал по гладкой горизонтальной дороге. Когда скорость была немногим более 60 км/час, рычаг скоростей был переведен в нейтральное положение и автомобиль катил по дороге, замедляясь под действием сопротивления воздуха и трения о дорогу. На замедление от 60 до 40 км/час ушло 10 сек. (В этом эксперименте надо определить полное сопротивление при скорости около 50 км/час.) Затем эксперимент повторялся, но при движении в обратном направлении, чтобы усреднить действие ветра и наклона дороги. Время менялось от 10 до 14 сек и в большинстве случаев было между 12 и 13 сек. Замедление составляло

$$\frac{20 \text{ км/час}}{12,5 \text{ сек}}, \text{ или } \frac{5,6 \text{ м/сек}}{12,5 \text{ сек}}, \text{ или } 0,44 \text{ м/сек}^2.$$

$$\begin{aligned} \text{Замедляющая сила} &= 1500 \text{ кг} \cdot 0,44 \text{ м/сек}^2 \\ &= 660 \text{ ньютон, или } 660 \text{ ньютон} : 9,8 \text{ ньютон/кг} \\ &\approx 68 \text{ кг.} \end{aligned}$$

На преодоление этого сопротивления на расстоянии 2 км расход энергии (на нагрев воздуха, дороги, шин и осей автомобиля) равен

$$F \cdot s, \text{ или } 660 \text{ ньютон} \cdot 2000 \text{ м} \approx 1,3 \cdot 10^6 \text{ дж.}$$

г) Чтобы сравнить это с теплотой, выделенной бензином, мы должны выразить оба количества энергии в одних и тех же единицах:

$$\text{Теплота, выделенная бензином} = 1600 \text{ Кал} = 1600 \text{ Кал} \cdot 4200 \text{ дж/Кал} = 6,7 \cdot 10^6 \text{ дж.}$$

Следовательно, из 6,7 млн. дж, выделенных бензином, на «полезное» продвижение затрачено только 1,3 млн. К.п.д. $= 1,3/6,7 \approx 20\%$, что довольно хорошо для двигателя, работающего на бензине.

Пример В. Вычисления с использованием кинетической энергии, равной $\frac{1}{2} mv^2$

(Не забудьте, что выражение для кинетической энергии выводилось из $F=ma$, поэтому она всегда выражается в абсолютных единицах — джоулях, а не в килограммометрах. Следовательно, силу в выражении $F \cdot s$ при вычислении кинетической энергии мы тоже должны выражать в абсолютных единицах.)

Ружейная пуля массой 0,002 кг вылетает из ствола длиной 0,8 м со скоростью 400 м/сек.

а) Какова ее кинетическая энергия?

б) Какова сила ¹⁾, разогнавшая ее из состояния покоя до этой скорости?

Ответы

$$\begin{aligned} \text{а) Энергия пули} &= \frac{1}{2} Mv^2, \text{ или } \frac{1}{2} 0,002 \cdot (400)^2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{сек}^2 \\ &= 0,001 \cdot 160\,000 = 160 \text{ ньютон} \cdot \text{м}, \text{ или дж.} \end{aligned}$$

б) Эта энергия образовалась из тепловой энергии газов при взрыве. Работа, описывающая этот переход, равна $F \cdot s$, или $(F \text{ ньютон}) \cdot (0,80 \text{ м})$.

Итак, $E_{\text{кин}} = 160 \text{ ньютон} \cdot \text{м} = (F) \cdot (0,80) \text{ ньютон} \cdot \text{м}$ при условии, что сила F полностью затрачена на ускорение пули, увеличение ее кинетической энергии

$$\text{СИЛА } F = \frac{160}{0,80} = 200 \text{ ньютон} \approx 20 \text{ кг.}$$

Довольно большое усилие для маленькой пули!

Пример Г. Иллюстрация закона сохранения энергии

(Попробуйте решить задачу самостоятельно, а потом, если нужно, заглянуть в ответ.)

Человек втаскивает на вершину обрыва высотой 40 м камень массой 2 кг.

а) Каков прирост потенциальной энергии камня?

б) Камень сбрасывается вниз. Сколько у него осталось потенциальной энергии после того, как он пролетел 10 м? Каков прирост кинетической энергии? Попробуйте сложить потенциальную и кинетическую энергии.

в) Сколько у камня осталось потенциальной энергии из первоначального запаса после того, как он пролетел все 40 м? Какова его кинетическая энергия перед приземлением?

г) Опишите изменение потенциальной и кинетической энергий, а также суммы этих энергий в процессе падения камня.

¹⁾ Имеется в виду средняя сила, создаваемая газами в стволе. Скорость сгорания пороха можно подобрать так, что эта сила будет почти постоянна.

а) Пропуст потенциальной энергии равен

$$\text{Вес} \cdot \text{Высота} = (2 \text{ кг} \cdot 9,8 \text{ ньютонов/кг}) \cdot 40 \text{ м} = (19,6 \text{ ньютонов}) \cdot (40 \text{ м}) = \\ = 784 \text{ ньютонов} \cdot \text{м}, \text{ или } 784 \text{ дж.}$$

б) Пролетев 10 м, камень оказался на высоте 30 м над землей, а его оставшаяся потенциальная энергия равна

$$(19,6 \text{ ньютонов}) \cdot (30 \text{ м}), \text{ или } 588 \text{ дж.}$$

Чтобы вычислить кинетическую энергию, необходимо знать скорость камня v . Сначала ¹⁾ из $s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ найдем t :

$$\begin{aligned} a &= 9,8 \text{ м/сек}^2, & s &= 10 \text{ м}, & v_0 &= 0, & t &=? \\ s &= v_0 t + \frac{1}{2} a t^2, & 10 &= 0 + \frac{1}{2} (9,8) t^2, \\ t^2 &= \frac{10}{4,9} = \frac{100}{49}, & t &= \frac{10}{7} \text{ сек.} \end{aligned}$$

Теперь $v = v_0 + at = 0 + (9,8)(10/7) = 14 \text{ м/сек}$;

$$\text{Кинетическая энергия} = \frac{1}{2} (2 \text{ кг}) (14^2 \text{ м}^2/\text{сек}^2) = 196 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{сек}^2 \\ = 196 \text{ ньютонов} \cdot \text{м} = 196 \text{ дж.}$$

В сумме обе энергии дают $= 196 + 588 \text{ дж} = 784 \text{ дж}$.

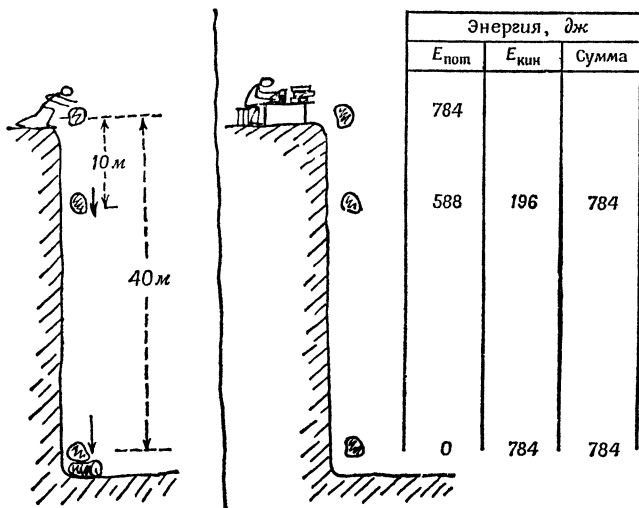
в) Пролетев 40 м, камень потерял всю потенциальную энергию. Падая $^{20/7}$ сек, он приобрел скорость 28 м/сек ;

$$\text{Кинетическая энергия} = \frac{1}{2} (2 \text{ кг}) \cdot (28^2 \text{ м}^2/\text{сек}^2), \text{ или } 784 \text{ дж.}$$

В сумме обе энергии дают: $784 \text{ дж} + 0 = 784 \text{ дж}$.

г) *Общее описание изменения энергии.* Когда камень падает из состояния покоя с высоты 40 м над землей, то он начинает движение с запасом потенциальной энергии 784 дж (полученной им от человека из его запаса химической энергии) и нулевой кинетической энергии. По мере падения его потенциальная энергия уменьшается, а кинетическая возрастает, но сумма обеих энергий остается на всех стадиях одной и той же, т. е. 784 дж. Непосредственно перед приземлением камень исчерпывает свою потенциальную энергию, но зато его кинетическая энергия становится максимальной, т. е. 784 дж. Когда камень ударяется о землю, его кинетическая энергия исчезает, превращаясь в теплоту (около $\frac{1}{5} \text{ Кал}$), которая нагревает камень, землю и воздух.

¹⁾ Более прямое вычисление см. ниже.



Фиг. 58.

Эта задача — простой, частный пример закона сохранения энергии. Восхитительный закон природы? Едва ли, просто мы так выбрали выражение $\frac{1}{2} Mv^2$ для кинетической энергии, чтобы оно было равно $F \cdot s$, а так как мы используем то же самое выражение $F \cdot s$ для характеристики изменения потенциальной энергии, то следует ожидать, что сумма обеих энергий будет оставаться постоянной как следствие нашего выбора.

Если какая-то часть движения падающего камня расходуется на трение о воздух, то сумма энергий не будет постоянной. Кинетическая энергия будет расти медленнее, так как трение требует своей доли. Поэтому без учета теплоты (и энергии воздушных токов), идущей на нагревание воздуха из-за трения, мы не получим закона сохранения энергии.

В пункте (б) мы выбрали некрасивый способ вычисления v ; сначала из формулы $s = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$ нашли время, затем из $v = v_0 + at$ определили скорость.

Все это делалось для того, чтобы избежать незнакомой нам формулы $v^2 = v_0^2 + 2as$. А если мы воспользуемся ею, то мгновенно получим

$$v^2 = 0^2 + 2 \cdot 9,8 \cdot 10 = 196 \text{ м}^2/\text{сек}^2,$$

$$v = \sqrt{196} = 14 \text{ м/сек}.$$

Кроме того, ясно, что эта формула немедленно дает сохранение энергии, ибо из нее и было получено $\frac{1}{2} Mv^2$.

Более общая алгебраическая форма записи. Предположим, что камень массой m начинает падать с начальной скоростью v_0 с высоты h_0 . К моменту, когда его высота станет h_1 , он пройдет расстояние $(h_0 - h_1)$ с ускорением g ,

направленным вниз, так что его скорость v_1 будет определяться выражением

$$v_1^2 = v_0^2 + 2g(h_0 - h_1).$$

Поэтому сумма кинетической и потенциальной энергий равна

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} m v_1^2 + m g h_1 &= \frac{1}{2} m [v_0^2 + 2g(h_0 - h_1)] + m g h_1 \\ &= \frac{1}{2} m v_0^2 + m g h_0 - m g h_1 + m g h_1 \\ &= \frac{1}{2} m v_0^2 + m g h_0, \end{aligned}$$

т. е. первоначальной сумме кинетической и потенциальной энергий. Следовательно, на любой высоте h_1 полная энергия та же, что и на первоначальной высоте h_0 .

Пример Д. Теплота и кинетическая энергия

Свинцовая пуля массой 0,006 кг, летящая со скоростью 400 м/сек, ударяет в стальную стенку и останавливается. Подсчитайте, насколько возрастет ее температура. Удельная теплоемкость свинца составляет 0,03, а 1 Кал = 4200 дж.

Примечание. Удельная теплоемкость 0,03 означает, что свинец требует в 0,03 раза больше тепла, чем та же масса воды при нагревании на одну и ту же температуру (см. гл. 27). Для нагревания воды массы M на $\Delta T^\circ \text{C}$ требуется $M \cdot \Delta T$ Кал. А в случае свинца потребуется теплоты в 0,03 раза больше, или $M \cdot \Delta T \cdot (0,03)$ Кал.

Предположим, что вся кинетическая энергия пули превратится в теплоту

$$\frac{1}{2} M v^2 = \frac{1}{2} (0,006) (400^2) = \underline{(0,006) \cdot 80\,000 \text{ дж}}.$$

Если повышение температуры (ΔT) равно $\Delta T^\circ \text{C}$, то поглощенное свинцом количество тепла равно

$$\begin{aligned} (\text{МАССА}) \cdot (\text{ПОВЫШЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ}) \cdot (\text{УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ}) &= \\ &= (0,006) \cdot (\Delta T) \cdot (0,03) \text{ Кал} \\ &= (0,006) \cdot (\Delta T) \cdot (0,03) (4200) \text{ дж}. \end{aligned}$$

Если вся кинетическая энергия переходит в теплоту и если вся теплота остается в свинце, то $(0,006) \cdot (80\,000)$ дж должны быть равны $(0,006)(\Delta T)(0,03)(4200)$ дж. Сокращая на массу пули, 0,006 (кстати, почему она должна сократиться?) и разрешая относительно ΔT , получаем

$$\Delta T = \frac{80\,000}{(0,03)(4200)} = 635^\circ \text{C}.$$

Как и многие ответы к задачам в учебниках, и этот ответ далек от реальности, ибо такое повышение температуры привело бы к плавлению свинца, а в реальном соударении часть теплоты передается стенке.

Замкнутые системы

Любые законы сохранения энергии, импульса, воды, денег... должны иметь дело с «замкнутой системой». Мы проводим вокруг рассматриваемой области мысленную границу, и должны быть уверены, что ни одна из сохраняющихся величин не пересекает этой границы. Тогда, утверждая, что нечто сохраняется, мы имеем в виду, что в пределах этой границы оно не может быть ни создано, ни уничтожено (не считая равных количеств положительного и отрицательного) и возможен лишь обмен. Доведенное до предела, это требование вынуждает нас в качестве замкнутой системы брать всю Вселенную, но в большинстве случаев даже небольшая совокупность тел или частиц оказывается практически замкнутой системой.

Вряд ли можно доказать закон сохранения денег для отдельного человека или для отдельного города. В каждом из этих случаев система не замкнута: деньги постоянно обращаются — текут то туда, то сюда. Однако можно обнаружить «закон сохранения денег» на небольшом острове. Требование замкнутости кажется достаточно очевидным, забыв о нем, можно прийти к парадоксам.

Стреляющее ружье не составляет замкнутой системы ни с точки зрения количества движения (импульса), ни с точки зрения энергии — и то, и другое возрастает. Но если ружье поставить на колеса, то *ружье+пуля+газы* образует практически замкнутую систему в отношении количества движения: все они получают равные, но противоположные количества движения, а полное количество движения системы остается неизменным. Для энергии нам нужно взять *ружье+порох+пулю*; только тогда можно рассчитывать на ее сохранение.

Сохранение механической энергии: $E_{\text{пот}} + E_{\text{кин}} = \text{const}$

Предположим, что у нас есть замкнутая система с точки зрения энергии, т. е. таких сил, которые бы вносили и уносили энергию через границу, нет. Результирующая сил, действующих на систему извне, должна быть равна нулю. Все внутренние силы должны распадаться на пары: F_1 и $-F_1$, F_2 и $-F_2$ и т. д. (третий закон Ньютона). Разлагая силы на подходящие компоненты и умножая их на пройденное расстояние, мы можем для любых изменений внутри системы вычислить передачу энергии. Для этого требуется досконально изучить геометрию системы и понимать, что силы — это векторы и действуют они независимо друг от друга. Здесь мы не будем вдаваться в подробности, но если все силы подобны упругим или силе тяжести, то они приведут к равным, противоположным переходам между различными сортами кинетической и потенциальной энергий. Рассуждения, однако, становятся несправедливыми, если встречаются силы, подобные трению, которые противятся всякому скольжению (т. е. не похожи на пружину, которая противится движению в одну сторону и помогает в другую). Если вы тащите камень без трения вверх по склону из точки *A* в точку *B*, то прирост потенциальной энергии будет оди-

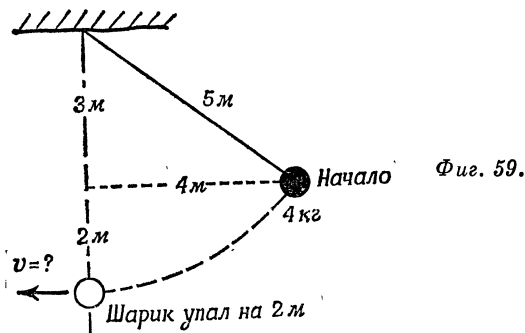
наков для прямого пути из A в B и для окольного. Но на шероховатом склоне чем длиннее путь, тем больше энергии переходит в теплоту. Таким образом, существенная особенность, позволяющая утверждать, что сумма потенциальной и кинетической энергий постоянна, состоит в следующем:

Потенциальная энергия зависит только от положения концов пружины, тела в поле силы тяжести и т. п. Изменение потенциальной энергии не зависит от выбранного пути.

Кинетическая энергия зависит только от скорости, но не от пути или времени, требуемого для ее достижения.

Мощное средство

Постоянство суммы кинетической и потенциальной энергий избавляет нас от многих вычислений. Для «консервативных систем», у которых отсутствует трение, на некоторые вопросы можно



ответить, не вычисляя внутренние силы. Например, маятник длиной 5 м с гирей массой 4 кг отклонили на 4 м по горизонтали и отпустили. Какова будет скорость гири в низшей точке? Маятник напоминает тело, скатывающееся по наклонной плоскости с *переменным наклоном*. Ускоряющая сила постоянно изменяется, и чтобы получить ответ сложением всех приращений скорости, пришлось бы немало потрудиться. Однако сохранение энергии позволяет найти его очень быстро:

$$\begin{aligned}
 (\text{КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ} + \text{ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ})_{\text{в начальной точке}} &= (\text{КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ} + \text{ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ})_{\text{в низшей точке}} \\
 0 + (4 \text{ кг}) \cdot (9,8 \text{ ньютон/кг}) \cdot (2 \text{ м}) &= \\
 = \frac{1}{2} (4 \text{ кг}) \cdot (\text{скорость})^2 + 0,
 \end{aligned}$$

$$v^2 = 39,2, \text{ а } v = 6,26 \text{ м/сек.}$$

Этот метод применим для любых путей — прямых, кривых, даже вверх и вниз, но при условии, что можно пренебречь трением. Так что теперь мы можем избавиться от правила Галилея для движения по наклонной плоскости (к которому мы обращались на ранней стадии). Масса M скатывается без трения из состояния покоя по наклонной плоскости высотой h и длиной L . Изменение потенциальной энергии равно Mgh , а увеличение кинетической энергии равно $\frac{1}{2}Mv^2$. Поверив в закон сохранения, мы говорим: поскольку $\frac{1}{2}Mv^2 = Mgh$, то $v^2 = 2gh$. Это дает конечную скорость $= \sqrt{2gh}$. Масса здесь сократилась — все массы движутся одинаково. Кроме того, вошла только высота h и нет никакого признака L , т. е. *конечная скорость будет одной и той же при любом наклоне и одинаковой высоте.*

Благосостояние и счастье человечества

Продукты питания снабжают нас химической энергией, которая, переходя в другие формы, согревает нас, поддерживает жизнедеятельность нашего организма и выполняет механическую работу (ходьба, поднятие грузов). Таким образом, вся наша энергия поставляется пищей или внутренними резервами (какой-то частью жировых запасов). Если вы поверили в закон сохранения энергии, то должны согласиться, что третьего выхода нет: либо нам надо потреблять достаточное количество пищи (и усваивать ее), либо «сжигать» собственный жир. Человек не может выполнить ни добавочной работы без дополнительного питания, ни нормальной работы на пониженном рационе, если он не воспользуется собственными запасами жира, которые в конечном счете тоже накопились благодаря питанию. Соединяясь с кислородом, топливо-пища превращается в углекислый газ и воду. При «сжигании» пищи до углекислого газа и воды освобождается определенное количество химической энергии независимо от характера промежуточных процессов. Если бы это было не так, мы могли бы опровергнуть закон сохранения энергии, т. е. создали бы себе пищу с помощью одного процесса и потребляли бы ее в другом, который высвобождал бы больше энергии! Так что энергосодержание пищи можно измерить сжиганием ее образцов в лаборатории. Поэтому мы можем *вычислить* калорийность не только собственного рациона, но и рациона всего человечества. По выдыханию CO_2 мы можем определить количество топлива, сжигаемого при различного рода деятельности: ходьбе, ночном сне, игре в футбол, работе в мастерской и 3-часовом пыхтении на экзамене по математике. Тем самым мы можем определить «цену» жизни. Подобные испытания проводятся с помощью маски, надеваемой на лицо испытуемого; эта маска собирает выдыхаемый воздух за короткий период времени, газометром измеряется объем выдыхаемого воздуха, и анализ образца дает количество кислорода, которое заменилось на CO_2 . Эти химические изменения за целый день дают нам полное количество пищи, «сожженное» испытуемым за время рабочего дня. Минимальный жизненный уровень, при котором поддерживается рабо-

та сердца, легких, минимум пищеварения, требует определенного количества энергии. Этот минимум энергии называется *основным обменом веществ*. В холодную погоду на нагревание тела требуется несколько больше энергии. Ходьба и другая умеренная деятельность предъявляют дополнительные требования, а усиленные упражнения требуют еще больше. При тяжелой физической работе мы должны потреблять гораздо большее количество пищи, чем это необходимо для самой работы, ибо к. п. д. нашего тела составляет только около 25%, а остальные 75% тратятся на теплоту.

Минимальный жизненный уровень здорового человека составляет около 2000 *Кал* в день; плавание или футбол требуют дополнительно 500 *Кал* в час, а для 8 часов тяжелой физической работы требуется еще 2000 *Кал* в день. Так что грузчику нужно вдвое больше питания, чем бездельнику, хотя последний имеет то же телосложение; следовательно, и есть грузчик должен вдвое больше. Но, с другой стороны, студенту, усиленно изучающему математику, нужно столько же питания, сколько и тогда, когда он бьет баклуши. Умственный труд требует очень небольших немедленных затрат — ум искушен, но, по-видимому, не жаден. Возможно, он предъявляет свои счета позднее.

Всем нам, если мы не сидим в тюрьме, не лежим в постели, облепившись до крайности, необходимо дополнительное питание сверх минимального уровня. Истощенный человек с недостаточным рационом не может «вершить дела». Либо он должен жить спокойной жизнью и даже лежать в постели, либо он постепенно будет «съедать» самого себя.

Именно пища ставит предел росту численности населения планеты. В мире, как целом, всегда были большие группы людей, находящихся на грани истощения. Каждый раз, когда создавались машины, облегчающие добычу продуктов питания или другую работу, население возрастало до нового уровня, определяемого количеством продуктов питания и топлива. В настоящее время количество продуктов питания и топлива регулирует жизнь и определяет благосостояние планеты, хотя в будущем большую угрозу может представлять нехватка пресной воды. И если когда-нибудь удастся достигнуть обильного снабжения как сельского хозяйства, так и промышленности дешевой термоядерной энергией, то жить станет веселее.

Масса, материя и энергия; $E=mc^2$

Часто приходится слышать утверждение, что «масса и энергия одно и то же», или же такие суждения, будто выражение $E=mc^2$ объясняет атомную бомбу. Сейчас, когда вы получили только первое представление об энергии и ее поведении, было бы поистине неразумно сбивать вас с толку такими утверждениями, как «масса равна энергии». Во всяком случае, такой способ трактовки великого открытия не из лучших. По-видимому, это всего лишь остроумие молодых реформистов, «галилеев нового времени». На деле же предсказание теории, которое проверено многими экспериментами, говорит лишь о том, что *энергия имеет массу*.

Сейчас мы разъясним современную точку зрения и дадим небольшой обзор истории ее развития.

Когда энергия любого материального тела возрастает, его масса увеличивается и мы приписываем эту дополнительную массу приросту энергии. Например, при поглощении излучения поглотитель становится горячее и его масса возрастает. Однако возрастание настолько мало, что остается за пределами точности измерений в обычных опытах. Напротив, если вещество испускает излучение, то оно теряет капельку своей массы, которая уносится излучением. Возникает более широкий вопрос: не обусловлена ли *вся* масса вещества энергией, т. е. не заключен ли во всем веществе громадный запас энергии? Много лет назад радиоактивные превращения на это ответили положительно. При распаде радиоактивного атома выделяется огромное количество энергии (в основном в виде кинетической энергии), а малая часть массы атома исчезает. Об этом ясно говорят измерения. Таким образом энергия уносит с собой массу, уменьшая тем самым массу вещества.

Следовательно, *часть* массы вещества взаимозаменяема массой излучения, кинетической энергией и т. п. Вот почему мы говорим: «энергия и вещество способны частично к взаимным превращениям». Более того, мы теперь можем создавать частицы вещества, которые *обладают* массой и способны полностью превращаться в излучение, также имеющее массу. Энергия этого излучения может перейти в другие формы, передав им свою массу. И наоборот, излучение способно превращаться в частицы вещества. Так что вместо «энергия обладает массой» мы можем сказать «*частицы вещества и излучение взаимопревращаемы, а потому способны к взаимным превращениям с другими формами энергии*». В этом и состоит создание и уничтожение вещества. Такие разрушительные события не могут происходить в царстве обычной физики, химии и техники, их следует искать либо в микроскопических, но активных процессах, изучаемых ядерной физикой, либо в высокотемпературном горниле атомных бомб, на Солнце и звездах (см. гл. 43 и 44¹⁾). Однако было бы неразумно утверждать, что «энергия — это масса». Мы говорим: «энергия, как и вещество, *имеет* массу». Но масса порции энергии дается выражением

$$m = (\text{энергия}) / (\text{скорость света})^2.$$

Обозначая скорость света²⁾ стандартным значком c , имеем $m = E/c^2$, или после перестановки $E = mc^2$.

¹⁾ Гл. 43 («Физика атомного ядра») и гл. 44 («Современная физика») входят в т. 3 настоящего издания.

²⁾ $c = 3,0 \cdot 10^8$ м/сек. Чтобы получилось общепринятое выражение, заменим значок массы M на m .

Для вещества $E=mc^2$. Мы говорим, что масса обычного вещества таит в себе огромный запас внутренней энергии, равной произведению массы на (скорость света)². Но эта энергия заключена в массе и не может быть высвобождена без исчезновения хотя бы части ее.

Как возникла столь удивительная идея и почему она не была открыта раньше? Ее предлагали и раньше — эксперимент и теория в разных видах, — но вплоть до нашего века изменение энергии не наблюдали, ибо в обычных экспериментах оно соответствует невероятно малому изменению массы. Однако сейчас мы уверены, что летящая пуля благодаря своей кинетической энергии имеет дополнительную массу. Даже при скорости 5000 м/сек пуля, которая в покое весила ровно 1 г, будет иметь полную массу 1,000000000001 г. Раскаленная добела платина массой 1 кг всего прибавит 0,000000000004 кг и практически ни одно взвешивание не сможет зарегистрировать эти изменения. Только когда из атомного ядра высвобождаются огромные запасы энергии или когда атомные «снаряды» разгоняются до скорости, близкой к скорости света, масса энергии становится заметной¹⁾.

Обычная кинетическая энергия дает заметный вклад в массу очень быстрых протонов, получаемых на циклотронах, и это создает трудности при работе с такими машинами.

Почему мы все же верим, что $E=mc^2$?

Откуда взялось соотношение $E=mc^2$? Почему же мы думаем, что энергия E имеет массу E/c^2 ? Сейчас мы воспринимаем это как прямое следствие теории относительности, но первые подозрения возникли еще сто лет назад в связи со свойствами излучения. Тогда казалось вероятным, что излучение обладает массой. А поскольку излучение переносит, как на крыльях, со скоростью c

¹⁾ С другой стороны, даже едва уловимая разница масс знаменует возможность выделения огромного количества энергии. Так, атомы водорода и гелия имеют относительные массы 1,008 и 4,004. Если бы четыре ядра водорода смогли объединиться в одно ядро гелия, то масса 4,032 изменилась бы до 4,004. Разница невелика, всего 0,028, или 0,7%. Но она означала бы гигантское выделение энергии (преимущественно в виде излучения); 4,032 кг водорода дали бы 0,028 кг излучения, которое имело бы энергию

$$0,028 \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \text{ дж, или около } 600\,000\,000\,000 \text{ Кал.}$$

Сравните это с 140 000 Кал, выделяющимися при соединении того же количества водорода с кислородом в химическом взрыве.

энергию, точнее, само есть энергия, то появился пример массы, принадлежащей чему-то «невещественному». Экспериментальные законы электромагнетизма предсказывали, что электромагнитные волны должны обладать «массой», равной (энергия)/ c^2 . Но до создания теории относительности только необузданная фантазия могла распространить соотношение $m=E/c^2$ на другие формы энергии (см. гл. 31).

1) Указание о существовании соотношения $E=mc^2$ для излучения

Всем сортам электромагнитного излучения (радиоволнам, инфракрасному, видимому и ультрафиолетовому свету и т. д.) свойственны некоторые общие черты: все они распространяются в пустоте с одинаковой скоростью c , все переносят энергию и импульс. Мы представляем себе свет и другое излучение в виде волн, распространяющихся с большой, но определенной скоростью $c=3\cdot 10^8$ м/сек. Когда свет падает на поглощающую поверхность, возникает теплота, показывающая, что поток света несет энергию. Эта энергия должна распространяться вместе с потоком с той же скоростью света. На деле скорость света именно так и измеряется: по времени пролета порцией световой энергии большого расстояния ¹⁾.

При отражении света от зеркала теплота не выделяется, ибо отраженный луч уносит всю энергию, но на зеркало действует давление, подобное давлению упругих шариков или молекул. Если же вместо зеркала свет попадает на черную поглощающую поверхность, давление становится вдвое меньше. Это свидетельствует о том, что луч несет количество движения, поворачиваемое зеркалом. Следовательно, свет ведет себя так, как если бы у него была масса. Но можно ли откуда-то еще узнать, что нечто обладает массой? Существует ли масса по своему собственному праву, как, например, длина, зеленый цвет или вода? Или это искусственное понятие, определяемое поведением наподобие Скрамности? Масса, на самом деле, известна нам в трех проявлениях:

А. Туманное утверждение, характеризующее количество «вещества». (Масса с этой точки зрения присуща веществу — сущности, которую мы можем увидеть, потрогать, толкнуть.)

Б. Определенные утверждения типа $F\Delta t=\Delta(Mv)$ и $E_{кин}=\frac{1}{2}Mv^2$.

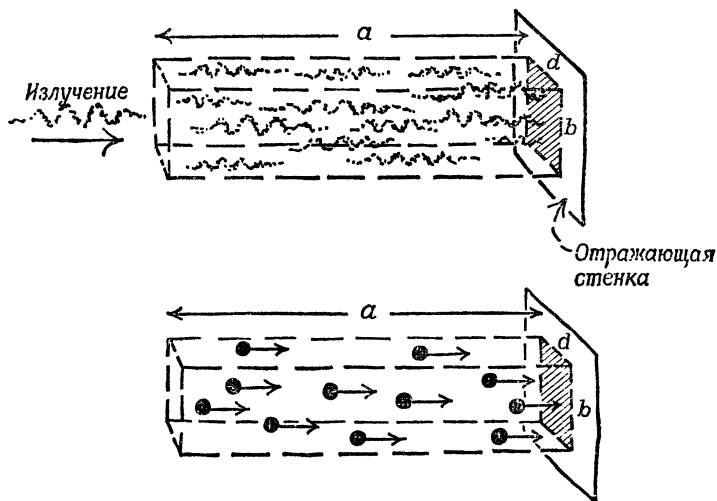
В. Масса сохраняется.

¹⁾ Когда свет падает на поверхность некоторых металлов, он выбивает электроны, вылетающие точно так же, как если бы их ударил компактный шарик. Энергия света, по всей видимости, распространяется концентрированными порциями, которые мы называем «квантами». В этом и заключается квантовый характер излучения, несмотря на то, что эти порции, по-видимому, создаются волнами. Каждая порция света с одной и той же длиной волны обладает одной и той же энергией, определенным «квантом» энергии. Такие порции мчатся со скоростью света (собственно, они-то и есть свет), перенося энергию и количество движения (импульс). Все это позволяет приписать излучению некую массу — каждой порции приписывается определенная масса.

Если мы отбросим неясное утверждение и отложим пока сохранение, то остается *определить* массу через количество движения и энергию. Тогда любая движущаяся вещь с количеством движения и энергией должна иметь «массу». Ее массой должно быть $(\text{количество движения})/(\text{скорость})$, или $2(E_{\text{кин}})/(\text{скорость})^2$.

Массу излучения нетрудно найти из оказываемого им давления при помощи следующих вычислений.

Давление солнечного луча на зеркало очень мало, но его можно измерить с помощью чувствительной «световой мельницы» в вакууме, а плотность



Фиг. 60. Радиационное давление.

энергии измеряется по нагреванию небольшого черного поглотителя. Измерения показывают:

$$\left[\begin{array}{l} \text{ДАВЛЕНИЕ СВЕТА} \\ \text{на отражающее его зеркало} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Удвоенная} \\ \text{ПЛОТНОСТЬ ЭНЕРГИИ,} \\ \text{равная} \\ \text{(ЭНЕРГИЯ ПУЧКА)/(ЕГО ОБЪЕМ)} \end{array} \right].$$

Это согласуется с выводами законов электромагнетизма. Попробуем теперь получить давление из расчетов кинетической теории.

Пусть пучок света протяженностью a (фиг. 60) падает перпендикулярно на кусочек зеркала сечением $b \times d$ и отражается им. Представим себе, что свет — это N упругих шариков массой m , летящих со скоростью c . Тогда время, необходимое для того, чтобы весь пучок попал на зеркало, будет a/c . Полное

изменение количества движения равно $N \cdot 2mc$, т. е.

$$\text{СИЛА} = \frac{\text{ИЗМЕНЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ДВИЖЕНИЯ}}{\text{ВРЕМЯ}} \\ = \frac{N \cdot 2mc}{a/c} = \frac{2 \cdot N \cdot mc^2}{a},$$

или ¹⁾

$$\text{ДАВЛЕНИЕ} = \frac{\text{СИЛА}}{bd} = \frac{2Nmc^2}{abd} = \frac{2Mc^2}{\text{ОБЪЕМ}}.$$

Сравним это с экспериментом. Тогда

$$\frac{2 (\text{ЭНЕРГИЯ})}{\text{ОБЪЕМ}} = \frac{2Mc^2}{\text{ОБЪЕМ}},$$

т. е. энергия пучка света равна Mc^2 , или $M = E/c^2$.

Таким образом, излучение, подобно потоку шариков, обладает массой, равной E/c^2 . Это не строгое доказательство, а некое возможное истолкование экспериментальных следствий. Гораздо лучший вывод дан в конце гл. 31.

Формула $E = mc^2$ напоминает выражение $E = \frac{1}{2} Mv^2$. Поскольку мы имеем дело с излучением, то v должно замениться на c . Но куда делась $\frac{1}{2}$? Причина в том, что формула $\frac{1}{2} Mv^2$ дает неточное выражение для кинетической энергии. Оно справедливо для обычных скоростей, а для больших скоростей, близких к c , теория относительности дает другое выражение, о котором будет сказано в следующем разделе ²⁾.

¹⁾ Это в точности выражение для давления газа, но с потерянной $\frac{1}{3}$, так как весь пучок движется в одном направлении, а не случайным образом. Кроме того, появился множитель 2, так как мы учитывали энергию только падающего пучка, а не падающего и отраженного вместе.

²⁾ До создания теории относительности кинетическая энергия была равна $\frac{1}{2} Mv^2$ для любых скоростей и отсюда вытекало, что для упругих шариков

$$\text{ДАВЛЕНИЕ} = \frac{2Nmc^2}{\text{ОБЪЕМ}} \\ = \frac{4 (E_{\text{кин}})}{\text{ОБЪЕМ}},$$

но эксперимент для пучка света давал

$$\text{ДАВЛЕНИЕ} = \frac{2 (\text{ЭНЕРГИЯ})}{\text{ОБЪЕМ}}.$$

Вот простое объяснение этого расхождения, которое предлагалось в то время. Хотя оно подверглось критике и сейчас вышло из моды, но вам оно может оказать помощь. Солнечный свет — *отнюдь не* поток шариков, летящих с некой кинетической энергией. Это поток волн, который подобно любым колебательным системам содержит в равных долях потенциальную и кинетическую энергию.

Как и в качающемся маятнике или колеблющемся атоме, энергия в волне должна перекачиваться то туда, то сюда — из кинетической энергии в потенциальную и обратно. Алгебраическое усреднение этих энергий показывает, что их средние значения должны быть одинаковыми. Для электромагнитных волн потенциальную энергию можно ассоциировать с электрическим полем, а кинетическую — с магнитным. Следовательно, массой излучения M нуж-

Излучение имеет массу E/c^2 . При испускании излучения источник испытывает отдачу и мы заключаем, что он теряет массу E/c^2 . При поглощении излучения приемник должен приобретать дополнительную массу E/c^2 . Так что к излучению и его взаимодействию с веществом применим закон $E=Mc^2$. А можно ли его обобщить и всем формам энергии приписать массу E/c^2 ? Теория относительности отвечает утвердительно.

2) Теория относительности

Стремление увязать воедино серию экспериментальных парадоксов, касающихся абсолютного пространства и времени, породило теорию относительности. Два сорта экспериментов со светом давали противоречивые результаты, а опыты с электричеством еще больше обострили этот конфликт. Тогда Эйнштейн предложил изменить простые геометрические правила сложения векторов. Это изменение и составляет сущность его «специальной теории относительности». Более детальному обсуждению ее посвящена гл. 31. Теперь же мы примем эйнштейновскую схему обращения с длинами, временем, скоростями и другими векторами. После этого конфликты исчезнут, а экспериментальные результаты и общие законы уложатся в единую схему.

Для малых скоростей (от медлительной улитки до быстрой ракеты) новая теория согласуется со старой: кинетическая энергия равна $\frac{1}{2} Mv^2$, а вещество сохраняет постоянную массу независимо от того, движется оно или нет. При высоких скоростях, сравнимых со скоростью света, наше измерение длин или времени модифицируется движением тела относительно наблюдателя, в частности масса тела становится тем больше, чем быстрее оно движется. Эйнштейн показал, что для тела, движущегося мимо нас со скоростью v , вместо правила $m=\text{const}$, нужно пользоваться формулой $m=(\text{постоянная})/\sqrt{1-v^2/c^2}$, где c — скорость света.

Входящую сюда постоянную мы называем «массой покоя» тела, m_0 . После этого эйнштейновская формула принимает вид $m=m_0/\sqrt{1-v^2/c^2}$. Теория электричества уже использовала этот закон для «массы» движущихся электрических зарядов, а эксперименты с электронами высоких скоростей подтвердили его. Затем теория относительности провозгласила, что это увеличение массы носит совершенно общий характер. При обычных скоростях никаких изменений нет и только при скорости 100 000 000 км/час масса возрастает на 1%. Однако для электронов и протонов, вылетающих из радиоактивных атомов или современных ускорителей, оно достигает 10, 100, 1000%.... Опыты с такими высокоэнергетическими частицами великолепно подтверждают соотношение между массой и скоростью.

Любая обычная скорость настолько мала по сравнению с c , что отношение v/c будет очень мало, а v^2/c^2 — и того меньше. Следовательно, $\sqrt{1-v^2/c^2}$

но наделять как «кинетическую» энергию $\frac{1}{2}Mc^2$, так и «потенциальную» $\frac{1}{2}Mc^2$, получая в итоге полную энергию Mc^2 . Наше предсказание тогда выглядит так:

$$\text{ДАВЛЕНИЕ} = \frac{2Nmc^2}{\text{ОБЪЕМ}} = \frac{2Mc^2}{\text{ОБЪЕМ}} = \frac{2(\text{ЭНЕРГИЯ})}{\text{ОБЪЕМ}},$$

что согласуется с экспериментом. Это была попытка доказать, что свет представляет собой волны с потенциальной и кинетической энергиями, а не «частицы». Теперь же мы нашли лучший выход.

практически равно единице. При малых скоростях масса оказывается постоянной, $m=m_0/1$.

Затем, приняв ньютоновское определение силы $F=\Delta(mv)/\Delta t$ и измеряя работу произведением $F \cdot \Delta s$, Эйнштейн показал, что *кинетическая энергия* любого движущегося тела равна $(m-m_0)c^2$. Поскольку $(m-m_0)$ — это приращение массы вследствие движения, то $E_{\text{кин}}=(\text{приращение массы}) \cdot c^2$. Это и есть соотношение $E=mc^2$ для кинетической энергии и ее массы. Добавляя сюда постоянный запас энергии, заключенный в массе, m_0c^2 , Эйнштейн нашел, что

$$\text{ПОЛНАЯ ЭНЕРГИЯ} = (m - m_0) c^2 + m_0 c^2 = mc^2.$$

(Более детально эти вопросы будут обсуждаться в гл. 31, но даже там мы не дадим вывода, ибо он требует высшей математики.)

Формула $E_{\text{кин}}=(m-m_0)c^2$ выглядит совсем по-другому, чем $E_{\text{кин}}=1/2mv^2$. Они действительно отличаются, как и должно быть. Но посмотрите на эту величину при малых скоростях. Предположим, что v мало по сравнению с c , так что и v^2/c^2 мало по сравнению с единицей. Затем, пользуясь теоремой о биноме (см. гл. 22, примечание на стр. 239), получаем

$$\begin{aligned} E_{\text{кин}} &= (m - m_0) c^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - m_0 c^2 \\ &= m_0 c^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-1/2} - m_0 c^2 \\ &= m_0 c^2 \left[1 - \left(-\frac{1}{2} \right) \frac{v^2}{c^2} + \right. \\ &\quad \left. + \text{Члены, содержащие } \frac{v^4}{c^4} \text{ и т. д.} \right] - m_0 c^2 \\ &= m_0 c^2 + \frac{1}{2} m_0 c^2 \frac{v^2}{c^2} + \text{Малые члены} - m_0 c^2 \\ &\approx m_0 c^2 + \frac{1}{2} m_0 v^2 - m_0 c^2 = \frac{1}{2} m_0 v^2, \end{aligned}$$

т. е. старое выражение для кинетической энергии. Вот как работает хорошая теория, воспроизводя в предельном случае старый результат и указывая на его ограничение — малые скорости.

Мы говорим, что дополнительная масса движущегося тела — это масса ¹⁾ его кинетической энергии. Тело с массой покоя m_0 при *любой* скорости обладает массой $m_0 + (E_{\text{кин}}/c^2)$, как это нетрудно увидеть из вида кинетической энергии в теории относительности. При малых скоростях биномиальное приближение дает

$$m = m_0 + \left(\frac{1}{2} \frac{mv^2}{c^2} \right) = m_0 + \frac{E_{\text{кин}}}{c^2}.$$

¹⁾ При высоких скоростях за счет *дополнительной* массы тело приобретает *дополнительную* кинетическую энергию. Следовательно, появляется еще большая масса, которая делает кинетическую энергию немного больше. Эта «последовательность» сходится к определенной массе. Но, как только v приближается к c , истинная формула дает для любого кусочка вещества бесконечную массу (и бесконечную энергию).

На другом краю находится излучение, не имеющее массы покоя ($m_0=0$). Это не вещество и его нельзя удержать в покое; оно просто имеет массу m и движется со скоростью c , так что его энергия равна mc^2 . О порциях энергии, или квантах, мы говорим как о *фотонах*, когда хотим отметить поведение света как потока частиц. Каждый фотон имеет определенную массу m , определенную энергию $E=mc^2$ и количество движения (импульс) mc .

3) Ядерные превращения

В некоторых экспериментах с ядрами массы атомов после бурных взрывов, складываясь, не дают ту же самую полную массу. Освобожденная энергия уносит с собой и какую-то часть массы; кажется, что недостающая часть атомного материала исчезла. Однако если мы припишем измеренной энергии массу E/c^2 , то обнаружим, что *масса сохраняется*.

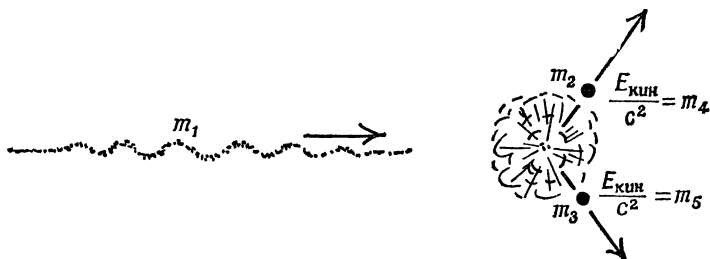
4) Аннигиляция вещества

Мы привыкли думать о массе как о неизбежном свойстве материи, поэтому переход *массы* из вещества в излучение — от лампы к улетающему лучу света — выглядит почти как уничтожение *вещества*. Еще один шаг — и мы с удивлением обнаружим то, что происходит на самом деле: положительный и отрицательный электроны, частички вещества, соединившись вместе, полностью превращаются в излучение. Масса их вещества превращается в равную ей массу излучения. Это случай исчезновения вещества в самом буквальном смысле. Как в фокусе, во вспышке света.

Измерения показывают, что (*энергия излучения при аннигиляции*)/ c^2 равна полной *массе* обоих электронов — положительного и отрицательного. Антипротон, соединяясь с протоном, аннигилирует, обычно с выбросом более легких частиц с большой кинетической энергией.

5) Создание вещества

Сейчас, когда мы научились распоряжаться высокоэнергетическим излучением (сверхкоротковолновыми рентгеновскими лучами), мы можем приготовить из излучения частицы вещества. Если такими лучами бомбардировать



Фиг. 61.

мишень, они дают иногда пару частиц, например положительный и отрицательный электроны. И если снова воспользоваться формулой $m=E/c^2$ как для излучения, так и для кинетической энергии, то масса будет сохраняться.

Сохранение вещества и энергии

Итак, мы ожидаем, что когда вещество теряет или приобретает энергию, даже если оно полностью исчезает или целиком создается, масса, с учетом массы излучения и других форм энергии, будет сохраняться. Хотя утверждение «вещество — это замороженная энергия» выглядит по-газетному наивно, теперь мы все же думаем, что так оно и выходит, что масса как комбинированное свойство вещества и энергии есть универсальная сохраняющаяся величина. Мы имеем экспериментальное подтверждение этого для нескольких видов энергии: ядерной, излучения, обычной кинетической... и нет причин сомневаться в этом общем правиле. Если угодно, мы можем соединить законы сохранения массы и энергии в один Великий Закон Сохранения *массы вещества + массы энергии*.

Энергия, заключенная в веществе

Поскольку переходы между веществом и энергией *все же существуют*, мы можем рассматривать массу всего вещества как массу некой «внутренней энергии». Однако в обычных случаях этот запас недоступен. Капелька его выделяется при радиоактивных превращениях, чуть побольше — при делении и синтезе ядер и, насколько нам сейчас известно, только при аннигиляции пар (электронов и других частиц со своими античастицами) выделяется большая доля массы.

Другие формы энергии?

Какие же еще существуют формы энергии? Обычно ученые отвечают на это довольно странно: «Ну, а какие еще формы вам необходимы?» Необходимы? Для чего? Когда в прошлом мы открывали новые формы энергии, то вскоре обнаруживалось, что они укладываются в общую схему и подчиняются одному великому бухгалтерскому правилу: *сумма всех сортов энергии остается постоянной, или энергия никогда не создается и не уничтожается, она только переходит из одной формы в другую*. В современной науке эта схема оказалась настолько полезной, что, развались она, мы бы почувствовали себя несчастными и остались бы «беспризорными». Если мы действительно обнаружим изменение энергии, которая не входит в наш теперешний список форм энергии, если мы обнаружим, что энергия исчезает или появляется из ничего, то попробуем придумать новый вид энергии, который учел бы эту

разницу. Выглядит это не очень честно и напоминает банкира, выдумавшего клиента, чтобы сбалансировать свои счета! Так оно и было бы, если бы мы не публиковали открыто и честно свои предположения и не помнили, что сделали их. Но все же это рискованно. Оглядываясь на историю развития наших представлений об энергии, можно сказать, что прежде мы шли на такой риск и он великолепно оправдывался. Всего лишь столетие назад мысль о том, что теплота — это форма энергии, казалась странной. Многие ученые соглашались с ней, а другие говорили об этом как о культе. Мысль о том, что в атомном ядре заключена энергия, была порождена радиоактивностью примерно полвека назад, но полное подтверждение пришло лишь в последние годы.

Нейтрон — этот важнейший элемент атомных реакторов — был обнаружен вследствие недостачи в энергетическом балансе. Вера в законы сохранения энергии и импульса в атомных соударениях (вопреки очевидному нарушению) привела к убеждению, что существует невидимая частица, которая вскоре была названа *нейтроном*. А раз додумались до этого, то нетрудно было и открыть эту частицу экспериментально. Затем вопрос о сохранении энергии возник в другой области ядерных превращений. Некоторые радиоактивные ядра испускали электроны (β -лучи), но при одинаковых конечных продуктах электроны из атомов вылетали с различной скоростью. Их кинетическая энергия изменялась от нуля до некоего характерного максимума. Таким образом, из учета выпадало большое и переменное количество энергии, а заодно исчезало и некое количество движения и момента количества движения. Тогда физики изобрели самую маленькую частичку из всего атомного арсенала — нейтрино. Она не имеет заряда, как полагают, и не имеет массы покоя; она может вылетать из атома невидимой, почти неуловимой, унося в точности нужную (!) кинетическую энергию и момент количества движения, так чтобы счет был сбалансирован. Бессовестная выдумка? Вряд ли бессовестная, но, конечно, рискованная, а может и неумная. В худшем случае, это похоже на казначейство, выпускающее лишние деньги. Но в благоприятном случае это может привести к новым экспериментам и расширению наших знаний. Тем не менее вся эта готовность придумать «божественную» (!) форму энергии должна казаться возмутительной. На банковском языке она напоминает таинственную графу в счетах «плата за доброжелательность» или непредвиденного «божественного» клиента. И хотя это случается, все же не происходит краха банка и банкир сохраняет доброе имя. Нейтрино на самом деле оказалось подлинным клиен-

том в нашем банке. На протяжении многих лет, оставаясь неуловимым, оно продолжало исправно балансировать наши счета. А в последнее время было получено прямое экспериментальное доказательство существования нейтрино.

С такими неразвешенными сомнениями мы вернемся к ключевому вопросу: «Является ли энергия чисто экспериментальным объектом, а ее сохранение целиком основано на эксперименте или это схема, о которой мы мечтаем и о которой условились и стараемся поддержать ее?» В ограниченной области механической энергии можно считать, что сохранение гарантировано законами Ньютона и векторным характером сил. И, конечно, вы с уверенностью будете считать закон сохранения энергии гарантированным и хорошо обоснованным экспериментально, после того как познакомитесь с работами прошлого века по теплоте как форме энергии (см. гл. 29). Будь общий закон сохранения энергии плодом недомыслия или воображения, ошибка выявилась бы еще много лет назад.

Однако сейчас вы можете рассматривать закон сохранения энергии в наиболее общем виде как нечто большее, нежели обобщение эксперимента. Он превратился в соглашение; в самосогласованной схеме энергия определяется так, что ее полная величина просто по определению должна оставаться постоянной. Если вы разочарованы, прочитайте следующее замечание Пуанкаре, одного из крупнейших физиков-теоретиков ¹⁾.

«Так как мы не в силах дать общего определения энергии, принцип сохранения ее попросту означает, что существует *нечто*, остающееся постоянным. Поэтому, к каким бы новым представлениям о мире ни привели нас будущие эксперименты, мы заранее знаем: в них будет нечто остающееся постоянным, что можно назвать *энергией*».

Задача 5. Вывод формулы

Используя определение ускорения и т. д., выведите выражение для кинетической энергии $Fs = \Delta(mv^2/2)$. (Покажите, что $v^2 = v_0^2 + 2as$, и выведите отсюда требуемый результат.)

Задача 6. Закон сохранения энергии

На бетонном тротуаре лежит мешок с песком в 100 кг. Рабочий поднял его на крышу здания на высоту 20 м, потом отпустил, мешок свободно упал на тротуар.

¹⁾ La Science et l'Hypothèse, Paris, 1902, ch. 10 (есть русский перевод: Наука и гипотеза, Петербург, 1906).

- а) Сколько химической энергии человека превратилось в потенциальную энергию земного притяжения? Выразите ее в джоулях.
- б) В тот момент, когда человек отпустил мешок,
 - 1) какой кинетической энергией обладал мешок?
 - 2) каким был запас потенциальной энергии мешка, если уровень тротуара принять за нулевой?
- в) Когда мешок, падая из состояния покоя, пролетел 1 сек, то
 - 1) как низко он успел упасть?
 - 2) какова его скорость?
 - 3) какова его кинетическая энергия?
 - 4) какова его потенциальная энергия?
 (Уровень тротуара принять за нулевой.)
- г) Какова сумма кинетической и потенциальной энергий?
- д) Когда мешок, падая из состояния покоя, пролетел 2 сек, ответы на вопросы 1 и 5 пункта (в), могут быть другими. Дайте ответ на каждый из них.
- е) То же для случая 3 сек.

Задача 7. Превращение энергии

В каждом из перечисленных в п. (а) — (т) событий энергия переходит из одной формы в другую. Найдите эти две формы. (Там, где встречается важная промежуточная форма, приведите и ее.) Виды энергии и предлагаемые обозначения даны в табл. 2 на стр. 410.

(Примечание. Полученная из пищи энергия животных — это химическая энергия.)

Пример

Быстро летящая пуля ударяется о стенку и останавливается.

Ответ: $E_{\text{кин}} \rightarrow E_{\text{тепл.}}$

- а) Человек поднимает с пола камень и кладет его на полку.
- б) Камень столкнули с полки, и он падает (но еще не упал на пол).
- в) Быстро падающий камень ударяется о землю.
- г) Человек кидает камень в горизонтальном направлении.
- д) Камень, брошенный по полу, останавливается.
- е) Порох в патроне взрывается, образуя сильно сжатый горячий газ.
- ж) Этот газ толкает пулю по стволу ружья.
- з) Мальчик берет волчок и запускает его.
- и) Волчок остановился.
- к) Аккумулятор в автомобиле раскаляет прикуриватель.
- л) Падаящая вода на гидроэлектростанции зарядила аккумулятор машины (с помощью генератора)¹⁾.
- м) Быстрое течение реки заряжает аккумулятор машины (с помощью турбины и генератора).
- н) Аккумулятор машины заряжает конденсатор (который затем может дать искру).
- о) В горячей печи имеется глазок, из которого пышет жаром.

¹⁾ Когда механизм равномерно вращается или постоянно движется, его кинетическая энергия одна и та же, никакого увеличения и уменьшения не происходит, следовательно, она не входит в баланс превращения энергии, о котором спрашивается в задачах.

- п) Огромный вес, падая, заставляет работать радиустановку (при помощи блоков, шестерен, генератора, радиоламп и т. д.), которая передает какие-то сигналы.
- р) Солнце обогревает жилище.
- с) Солнце способствует росту растений.
- т) Атомы радия излучают быстрые ядра гелия (альфа-частицы).

Задача 8

Человек тянет ящик массой 30 кг по шероховатому полу, прилагая горизонтальное усилие 100 ньютонов. Ящик движется с постоянной скоростью 3 м/сек.

- а) Каково ускорение ящика?
- б) Какова действующая на него результирующая сила?
- в) Каково, следовательно, должно быть сопротивление пола движению ящика?
- г) Увеличивает ли ящик свою кинетическую энергию в процессе движения?
- д) Сколько энергии затрачивает человек на ящик в течение 10 сек?
- е) Куда уходит энергия, затрачиваемая человеком?

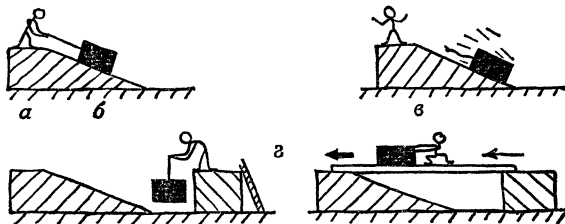
Задача 9

Человек тянет ящик массой 30 кг по не очень шероховатому полу с силой 100 ньютонов. Пол сопротивляется с силой 40 ньютонов. Ящик вначале покоился. Пользуясь абсолютными единицами силы, найдите:

- а) Ускорение ящика.
- б) Насколько он продвинется за 3 сек?
- в) Какую энергию затратит человек на ящик за эти 3 сек?
- г) Сколько из этой энергии передается шероховатой поверхности пола и в какой форме?
- д) Сколько энергии остается сверх этого в виде прироста кинетической энергии? [Найдите это вычитанием результата (в) из ответа на вопрос (в).]
- е) Вычислите скорость ящика спустя 3 сек. Воспользуйтесь соотношением $E_{\text{кин}} = \frac{1}{2}mv^2$ и найдите ее увеличение.
- ж) Согласуются ли (е) и (д)? (Если же нет, ...?)

Задача 10

Пусть дана наклонная плоскость без трения с уклоном 3 м на каждые 5 м по плоскости (или на каждые 4 м по основанию). На наклонной плоскости покоится ящик массой 40 кг.



Фиг. 62. К задаче 10.

- г) Если ящик удерживается веревкой, параллельной наклонной плоскости, то каково ее натяжение? (см. гл. 3).
- б) Предположим теперь, что человек на верхнем конце плоскости тащит ящик за веревку и вытягивает 10 м веревки без увеличения скорости ящика. Какую он затрачивает энергию?
- в) Допустим, что человек отпустил веревку и ящик скатывается на 10 м по плоскости. При тех же предположениях вычислите ускорение ящика, а отсюда конечную скорость и увеличение кинетической энергии.
- е) Пусть вместо втаскивания ящика по плоскости человек сначала поднял его вертикально на тот же уровень, затем без трения переместил по горизонтали на вершину плоскости (с помощью призрака Галилея!). Сколько энергии затратит он при таком подъеме ящика?

Задача 11. Энергия пули

Пуля массой 0,002 кг, двигаясь со скоростью 300 м/сек, попадает в кусок дерева массой 1,998 кг, покоящийся на идеально гладкой (без трения) поверхности стола. Пуля врезается в дерево (оно, весьма предостроительно, имеет нулевую массу), и вся система медленно движется по столу. Вычислите:

- а) Скорость системы после соударения (предполагая, как всегда, сохранение количества движения).
- б) Кинетическую энергию пули до соударения.
- в) Кинетическую энергию системы после соударения.
- г) Потерю кинетической энергии в ходе соударения.
- д) Какая доля (в %) первоначальной кинетической энергии пули сохранилась в виде кинетической энергии системы?
- е) Какая доля первоначальной кинетической энергии потеряна при соударении?
- ж) В какую форму (предположительно) перешла кинетическая энергия?

Задача 12. Вечный двигатель

Вечное движение (в смысле устройства, продолжающего движение без получения дополнительной энергии) вполне возможно.

- 1) Приведите один-два примера почти вечного движения.
- 2) Почему в большинстве случаев вечное движение все-таки не осуществляется?

Задача 13

Лыжный подъемник представляет собой петлю из троса, который перематывается мотором и втаскивает лыжников вверх по склону. Лыжный подъемник, приводимый в движение бензиновым мотором, втаскивает на гору лыжника, затем лыжник скатывается на лыжах по снегу, температура которого 0°C. Проследите за переходами энергии на протяжении возможно большего числа стадий. Опишите требуемые формы энергий и (там, где это не очевидно) механизм перехода.

При этом есть и ч. Когда машина движется или вращается с постоянной скоростью, у нее есть какая-то кинетическая энергия. Но она не увеличивается и не уменьшается и, следовательно, не входит в баланс энергий, о котором спрашивается в вопросах наподобие этого. Трос лыжного подъемника может передавать энергию деформации, но она просто поддерживает постоянную кинетическую энергию. Энергия вращения машины также постоянна, поэтому она тоже не входит в баланс,

Задача 14

Проследите в каждом из следующих случаев за переходами энергии вплоть до энергии Солнца:

- 1) уголь;
- 2) линия электропередачи от гидроэлектростанции.

Задача 15

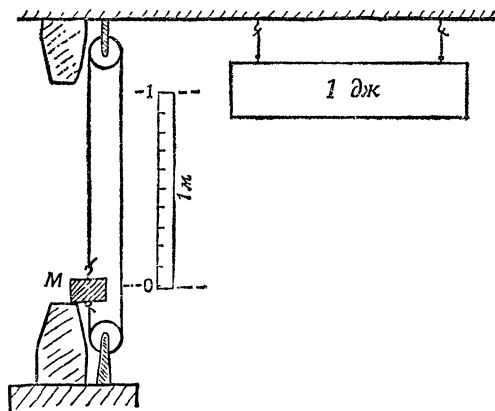
При полном сгорании 1 г животного жира дает 9,5 Кал (1 Кал=1000 кал). Пусть ваш нормальный рацион составляет 4000 Кал/день, а вы сократили рацион питания (включая сладости) до $\frac{3}{4}$ нормального, но продолжаете прежнюю физическую деятельность. Сколько килограммов вы потеряете за месяц?

Задача 16

- а) Свинцовая пуля массой 0,010 кг, летящая со скоростью 300 м/сек, ударяется о массивную стенку и останавливается. Вычислите возрастание температуры пули при условии, что вся кинетическая энергия пули превратилась в теплоту и вся теплота осталась в пуле. Напомним, что $\text{ТЕПЛОТА} = (\text{МАССА}) \cdot \Delta (\text{ТЕМПЕРАТУРЫ}) \cdot (\text{УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ})$ дает количество тепла в Кал, если масса взята в кг, а Δ (темп.) — в градусах (1 Кал=1 ккал=4200 дж¹⁾, удельная теплоемкость свинца равна 0,031).
- б) Поясните, почему при вычислении возрастания температуры нет необходимости знать массу пули.

Задача 17

Чтобы дать представление о величине 1 дж, на фиг. 63 показана установка. Туго натянутая струна пропущена через два блока, образуя петлю. В одной



Фиг. 63, К задаче 17,

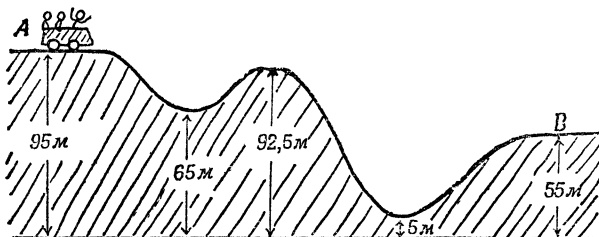
¹⁾ См. примечание на стр. 397.

точке к ней прикреплен груз M , а в другой — кольцо, так что, если потянуть за кольцо вниз, груз поднимается вверх. Ограничители дают грузу возможность подниматься только на 1 м.

Какова должна быть масса M ?

Задача 18

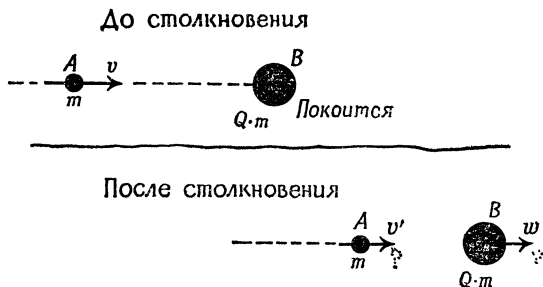
Тележка на «американских горах» массой 1000 кг начинает двигаться из состояния покоя в точке A по рельсам с вертикальным профилем (фиг. 64) и с пренебрежимо малым трением. Вычислите скорость ее в точке B .



Фиг. 64. К задаче 18.

Задача 19. Применение упругих соударений в ядерной физике

- а) Предположим, что частица A с массой m и скоростью v испытывает лобовое соударение с покоящейся частицей B той же массы m . Соударение упругое, так что сохраняется количество движения (как обычно) и кинетическая энергия. После соударения частица A движется со скоростью v' , а B — со скоростью w .



Фиг. 65. К задаче 19.

Напишите два уравнения, которые показывают, что соударение упругое; решив их, найдите, как движутся A и B после соударения (т. е. выразите v' и w через v).

- б) Пусть A , как и выше, ударяется в покоящуюся частицу B , но масса B теперь равна $2m$, т. е. вдвое больше массы A . Если это лобовое упругое соударение, то как будут двигаться A и B ?
- в) Как после соударения будут двигаться A и B при тех же условиях, что и в вопросе (а), за исключением того, что масса B в Q раз больше массы A , т. е. массы их m и $Q \cdot m$? (фиг. 65).
- г) Теперь вы получили «формулу», годную для применения в любом случае с данными отношением масс. Проверьте ее для случаев (а) и (б) (m , m и m , $2m$). (В этом достоинство формул. По серии измерений строится общая формула, которая сокращает время на расчеты. Но плохо, когда формула используется без понимания, слепо заимствуется откуда-то. Это столь же опасно, как и лечение по чужому рецепту.)
- д) Посмотрите по полученной в ответе на вопрос (в) формуле, что получится, если частица A во много раз массивнее частицы B , т. е. Q мало. Покажите, что шарик для гольфа должен отлететь от массивной клюшки со скоростью, почти вдвое большей скорости клюшки. (Если вы не согласны с этим выводом, попытайтесь сначала перейти к **э**ргодному пределу — легкий шарик ударяется о массивную стенку.)

Задача 20. Применение упругих соударений к ядерным реакторам

Воспользовавшись результатами задачи 19, ответьте на следующие вопросы:

- Частица A , двигаясь со скоростью v , испытывает упругое лобовое столкновение с частицей B .
- а) Какую долю первоначальной кинетической энергии теряет A , если
- 1) A и B имеют равные массы m и m ?
 - 2) B вдвое массивнее A ?
 - 3) Масса B очень мала по сравнению с A ?
 - 4) Масса B очень велика по сравнению с A ?
- б) В ядерных реакторах нейтроны замедляют, используя для этого редкие упругие соударения с ядрами некоторого вещества — «замедлителя», помещаемого с этой целью в реактор. По шкале, где ядро водорода имеет массу 1, ядро углерода имеет массу 12, алюминия — 23, свинца — 208, а электрон — 0,0005. Какое из веществ было бы лучшим замедлителем? Какое из них было бы на втором месте? Сам нейтрон по этой шкале имеет массу 1 («лучший» замедлитель на деле оказывается непригодным, ибо он поглощает нейтроны, так что мы должны предпочесть другое вещество. Конечно, не все соударения нейтронов лобовые, тем не менее это простое вычисление дает качественное указание).

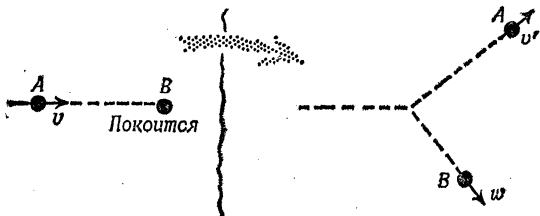
Задача 21. Математика — честный слуга

На одном из этапов вывода формулы в задаче 19 вы, по-видимому, сократили общий множитель w и получили простое уравнение с одним ответом. Каков «другой ответ» и что он означает?

Задача 22. Важность скользящих соударений

Пусть частица A , летящая со скоростью v , сталкивается с покоящейся частицей B той же массы. Удар не лобовой, частица A улетает в одном направлении, а частица B — в другом (фиг. 66). Покажите, что если соударе-

ние упругое, а частицы А и В имеют равные массы, то их траектории после соударения должны образовывать угол 90° . (У к а з а н и е. Поскольку количество движения — вектор, его сохранение можно представить в виде векторной диаграммы количеств движения частиц до соударения и после соударения. Если кинетическая энергия сохраняется ... Пифагора ...)



Фиг. 66. К задаче 22.

Проверьте этот ответ на упругих шариках из стали или слоновой кости, подвешенных на длинных нитях. Это дает важный способ проверки равенства масс в ядерной физике. Мы можем фотографировать следы α -частиц (из радия) в камере Вильсона. Иногда (весьма редко) α -частицы сталкиваются с ядрами и их следы образуют вилку наподобие буквы Y. Альфа-частицы — это ядра гелия, поэтому полученный выше результат предсказывает при соударении их с ядрами гелия прямой угол между следами на развилке. Фотографии следов в камере Вильсона, содержащей гелий (атомы его движутся слишком медленно и не портят предположений), дают в точности 90° на развилке.

Задача 23. Излучение: хороший пример из теоретической физики

(Это очень длинная задача, но она содержит важный анализ излучения. Вероятно, будет полезнее, если вы самостоятельно ответите на вопросы, нежели просто прочтете соответствующий текст и готовые ответы.)

Некоторые общие свойства излучения предсказываются при помощи нехитрых теоретических рассуждений, опирающихся на общие понятия теплоты и температуры. Дополните изложенные ниже рассуждения, и вы получите эти свойства.

Вообразите большой, хорошо изолированный сосуд, поддерживаемый при постоянной температуре, возможно очень высокой, так что его стенки раскалены добела; сосуд загроможден излучением, которое мечется туда и сюда между стенками ящика. Внутри сосуда создан вакуум, так что никакой теплопроводности и конвекции нет и теплота поступает к любым предметам в сосуде только в виде излучения.

Опыт показывает, что если в такой сосуд поместить несколько предметов с различной температурой, то постепенно их температура сравняется с температурой стенок, даже если эти предметы различны по размерам, форме, материалу и поверхности. Рассмотрите следующие случаи и угадайте некоторые свойства излучения.

- 1) Предположим, что в сосуд помещен небольшой диск В. На него падает излучение от стенок и других предметов в сосуде. Часть падающего излучения поглощается диском, а остальное отражается (и пропус-

кается диском, если он прозрачный). Поглощенное излучение превращается в теплоту, которая стремится нагреть диск. Но отраженная (и пропущенная) часть излучения не дает теплоты — она уносит свою энергию. В то же время диск сам испускает излучение и поток этого излучения зависит только от размеров, поверхности и температуры диска и не зависит от его окружения. Здесь делается очень важное предположение, что нагретое тело испускает излучение совершенно независимо от поглощения.

- а) После того как диск достиг окончательной температуры, он не нагревается и не охлаждается; каковы должны быть скорости поглощения излучения и его испускания по сравнению друг с другом? (Примечание. Просто потому, что температура перестала расти, эти две скорости не будут равны нулю. Диск по-прежнему в полной мере поглощает излучение и обильно испускает его.)
- б) Предположим, что вначале, когда диск поместили в сосуд, он был холоднее самого сосуда. Почему диск нагревается и в конце концов приобретает конечную температуру?
- в) Если же вначале диск был горячее сосуда, то почему он потом остывает и приобретает свою конечную температуру?
- г) Какое заключение (качественное) можно сделать из (б) и (в) относительно излучения и температуры?

2) Пусть теперь диск помещается попеременно в нескольких разных местах внутри сосуда, чтобы в каждом из этих мест диск приобрел со временем каждый раз достаточно постоянную температуру. Опыт показывает, что диск приобретет одинаковую температуру — температуру стенок сосуда независимо от того, куда он помещен.

- а) Поскольку диск находится при одной и той же температуре, куда бы его ни перемещали, испускаемое им количество излучения остается ... ?
- б) Что теперь вы можете сказать об интенсивности излучения в любом направлении и в любой части сосуда, которое попадает на диск?

3) Предположим теперь, что в сосуд помещены три диска А, В и С одинакового размера, но сделанные из разных материалов.

А — имеет блестящую металлическую поверхность (почти идеальное зеркало),

В — имеет черную поверхность (почти идеальный поглотитель),

С — прозрачный (стекло).

- а) Ответ на вопрос 2 говорит, что количество излучения, падающее на три разных диска А, В и С, должно быть ... ?
- б) Большая часть излучения, падающего на прозрачный диск, проходит сквозь него. Что происходит с большей частью излучения, падающего на диски А и В?
- в) Что происходит с остальной частью излучения, падающего на диски А, В и С?

4) Эти три диска, хотя и поглощают излучение, не становятся горячее, и их температура, благодаря тому что они испускают излучение, остается постоянной. Скорости поглощения излучения дисками различны, но нагреваются они все до одной и той же температуры. Что можно сказать на основании ваших прежних ответов об относительном количестве излучения, испускаемого этими тремя дисками?

- 5) Какое из этого следует общее свойство относительно испускания и поглощения поверхностями разного рода?
- 6) Согласуется ли с этим вашим заключением какой-либо лабораторный эксперимент? Если «да», то кратко опишите его.
- 7) Опишите коротко рассуждения, которые привели вас к выводу общего свойства. «Предположим, что различные тела (черное, зеркальное и прозрачное) в наполненной излучением печи достигают одинаковой температуры независимо от того, куда они помещены. Мы приходим к выводу, что ...» (продолжайте дальше сами).
- 8) «Невидимки» в печи. Предположим, что вы можете заглянуть через глазок внутрь горячей печи и рассматривать раскаленные стены и помещенные туда предметы А, В и С. Вы увидите пышущие жаром стены, на фоне которых совершенно невозможно различить А, В и С. (Именно с этим сталкиваются инженеры. Когда они смотрят в печь, то не могут различить предметы, находящиеся внутри нее. Вы можете убедиться в этом, заглянув в ярко горящую печь — контуры горящего угля или полена исчезают в общем жару.)
- а) Объясните эту неразличимость на основе всего сказанного выше.
- б) Поясните ваши рассуждения.

ГЛАВА 27 • ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ТЕПЛА И ТЕМПЕРАТУРЫ

С точки зрения поэта:

«О, ты, огонь, благословенный Богом,
Хвалу Ему воздай и славу на века».

С точки зрения ученого:

«...если вы можете измерить и выразить в числах то, о чем говорите, — вы знаете это; но если вы не можете измерить, если не можете выразить числами, — ваши знания скудны и недостаточны. Они могут быть началом науки, но едва ли одной лишь силой вашей мысли превратятся в ее фундамент».

Лорд Кельвин,

«Популярные лекции и речи», 1891 г.

Эта глава предназначена для самостоятельного изучения без помощи преподавателя. Как и ученому, вам следует знать, как измеряется теплота и температура. Если же вас интересует смысл науки, то вы убедитесь, что простые измерения порождают глубокие вопросы.

Мы опускаем здесь технические детали калориметрии и не приводим обычных лабораторных упражнений, чтобы уделить больше времени более существенным вопросам.

В первой части настоящей главы описаны примитивные опыты по измерению количества тепла, которые вам следует самим проводить в лаборатории. Вторая часть посвящена температуре от простых описаний и до обсуждения глубокого смысла этого понятия. Познакомьтесь с ним, насколько у вас хватит духу.

I. ТЕПЛОТА

Теплота и температура

Поставьте на огонь кастрюльку с водой и наблюдайте за ее температурой. Пламя отдает тепло кастрюльке и ее содержимому и повышает их температуру. Кастрюлю больших размеров с большим количеством воды нужно греть дольше и сжечь больше топлива, чтобы добиться такого же повышения температуры. Мы говорим большее количество *тепла*. В обыденном разговоре слово «тепло» звучит как синоним температуры, но в науке эти слова озна-

чают совершенно разные вещи ¹⁾. Теплом мы называем ту «субстанцию», которая делает предметы горячее. Температура же только показывает, насколько горяч предмет или каков его «уровень теплоты».

Описание температуры и количества тепла

Температура — это «степень нагретости» по определенной шкале. Градуировку термометра мы производим, исходя из нашего представления о тепле и холоде.

Чтобы один термометр согласовался с другим, мы приписываем двум стандартным уровням «нагретости» — тающему льду и бурлящему кипятку — два числа: 0 и 100, и делим промежуток на сто равных долей ²⁾. О смысле измерения температуры мы будем говорить позднее, а сейчас рассмотрим термометры, как нечто само собой разумеющееся, наподобие секундомера. Они говорят нам о степени нагретости данного предмета. Эту степень нагретости они характеризуют по определенной шкале, и их показания мы называем «температурой».

Теплота — это то, что делает предметы горячее, расплавляет твердые вещества или испаряет жидкости. Когда мы нагреваем железный стержень или сосуд с водой на пламени или на электроплитке, то можем представить себе, что в предметы «вливается» некоторое количество тепла в виде невидимой и невесомой субстанции, которая делает их горячее. Чем больше количество железа или воды, тем больше требуется теплоты. Эта теплота возникает из горящего топлива, и чтобы нагреть 2 л воды до желаемой температуры, его требуется вдвое больше, чем для 1 л, а 5 л требуют в 5 раз больше топлива, чем 1 л. Дополнительное повышение

¹⁾ К несчастью, ученые придали общепринятому в разговорном и литературном языке слову «тепло» совсем другой смысл. Мы говорим *«теплая вода»*, читаем о *«теплом дне»*. Во всех этих случаях ученые сказали бы *«температура»*. Они сохранили слово «теплота» для того таинственного, что выделяется топливом и заставляет повышаться температуру предметов. Этой разницей ученые и литераторы запутывают людей. Но литераторы здесь ни при чем. Нам самим следовало бы учесть разговорную практику и называть «теплом» то, что измеряет термометр, а для того, что нагревает предметы и, как выяснилось, является формой энергии, найти какое-то другое слово, хотя бы старое название «теплород». Однако мы уже не в силах изменить научный язык и должны мириться с укоренившимся разнообразием. Когда вы имеете дело с научными вопросами, лучшее, что можно сделать, это прибегать к словам «температура» и «теплота» в научном смысле.

²⁾ Так получается шкала Цельсия. (О шкале Фаренгейта см. примечание дальше.) Полезно различать 1° Ц (или 1° С) и 1° по шкале Цельсия. Первое — это температура на один градус выше точки таяния льда, второе же — повышение температуры на один градус в любом месте шкалы.

температуры также требует затрат большего количества топлива. Мы считаем, что если такое-то количество тепла нагревает предмет от 10 до 20° , то это же количество тепла нагреет его и от 20 до 30° . В большинстве случаев эксперименты подтверждают это. Если «массу» таинственной тепловой субстанции измерить по количеству топлива, то если

имеем

ТЕПЛОТА ~ РАСХОД ТОПЛИВА,

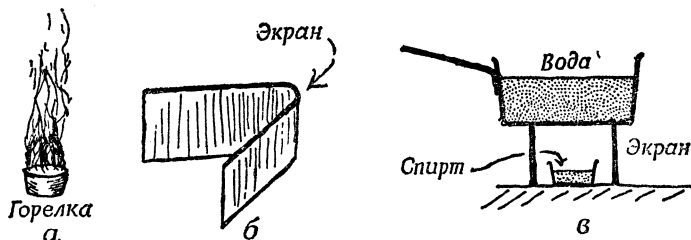
ТЕПЛОТА ~ МАССА НАГРЕВАЕМОГО МАТЕРИАЛА,
ТЕПЛОТА ~ ПОВЫШЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ МАТЕРИАЛА.

Первые опыты, проведенные около двухсот лет назад, не учитывали расхода топлива, но привели к тем же результатам, хотя теплота рассматривалась как некая невидимая субстанция и в опытах изучался ее переход от горячего тела к холодному. Мы тоже начнем с подобных опытов.

Поиски подходящего способа измерения теплоты

Опыт 1. Нагревание воды. (Попытайтесь сделать это в лаборатории. Если не удастся, то посмотрите де-

стеклянном сосуде. Наперсток спирта, сгорающий в металлической чашечке, создаст стандартную «пор-



Фиг. 67. Опыт 1.

а — горелка; б — защита горелки и подставка для кастрюли; в — схема опыта.

монстрационный опыт.) Нагрейте немного воду в металлическом или

«пору» тепла, одну и ту же во всех опытах¹⁾.

¹⁾ Можно использовать небольшой ковшиком объемом около 1 см^3 ; этим ковшиком легко зачерпывать денатурированный спирт и выливать его в чашечку из алюминиевой фольги. Такое количество спирта сгорает менее чем за минуту и сообщает сосуду несколько калорий. Можно также воспользоваться бунзеновской горелкой, подставляя ее на определенное время под сосуд, можно на минуту опускать в воду (лучше дистиллированную!) электрокипятильник. Но использование часов может сбить вас, так как время на самом деле в определение теплоты не входит.

1) Сообщите вашу «порцию» тепла 1 кг воды и замерьте повышение температуры.

2) Сообщите одну «порцию» 0,5 кг воды. Пламя едва ли «догадывается», сколько оно греет воды —

1 кг или 0,5 кг. Мы пытаемся рассматривать теплоту как некую невидимую субстанцию, проникающую в воду, и найти способ или схему измерения количества тепла, выделенного одной «порцией».

Правильный способ должен дать одинаковый ответ для обоих опытов. Разберите теперь три возможные схемы:

а) *Повышение температуры.* Допустим, что повышение температуры — это единственная мера количества тепла. Удовлетворяет ли оно нашему требованию: одинаково ли оно для обоих приведенных опытов? Нет.

б) Количество нагреваемой воды тоже важно, так как в случае большого количества воды повышение температуры будет меньше. Попробуйте сложить повышение температуры с массой воды. Пусть вам удалось найти формулу вроде

$$\Delta \text{ТЕМПЕРАТУРЫ} \cdot 43 + \text{МАССА ВОДЫ}.$$

Справедлива ли эта формула для другой массы, скажем 2 кг? в) Попробуйте умножить массу воды на повышение температуры.

Не придирайтесь к точности расчетов — они, конечно, очень грубы. Тепло легко утекает из любого прибора. В большинстве опытов экспериментаторы ведут отчаянную борьбу с потерями тепла в воздух и т. д., так что и в демонстрационном опыте и в вашем собственном вы можете рассчитывать лишь на грубое согласие.

Разнообразие экспериментов по нагреву успешно описывает предложенная выше схема (в), к тому же она согласуется с подходом к теплоте как энергии. Так что давайте примем ее и сформулируем правило.

П р а в и л о. Для измерения количества тепла нагрейте им воду и помножьте

$$\text{МАССА ВОДЫ} \cdot \text{ПОВЫШЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ}.$$

Единицы количества тепла

Если масса воды измеряется в килограммах, а повышение температуры — в градусах Цельсия, то теплота получается в (кг воды) · °С; мы называем эту единицу «килокалорией» («большой калорией»), или просто «Калорией»¹⁾ (с большой буквы).

¹⁾ До последнего времени всюду, кроме характеристики теплотворной способности питания, использовались малые калории. Мы в соответст-

Итак, 1 килокалория — это количество тепла, необходимое для нагревания 1 кг воды на 1°C . Если мы используем эти единицы теплоты, то наше правило кажется разумным. Например, «Сколько теплоты требуется для нагревания 3 кг воды на 5°C ?» Нагревание каждого килограмма на 1°C требует 1 *Кал* (по определению). Нагревание 1 кг на 5°C требует 5 *Кал*. Нагревание же 3 кг на 5°C требует в 3 раза больше, или $3 \times 5 = 15$ *Кал*. Итак, нагревание 3 кг на 5°C требует 15 «единиц», каждая из которых нагревает 1 кг на 1°C , или 15 *Кал*.

В общем случае нагревание M кг воды на Δt градусов требует $M \cdot \Delta t$ *Кал*. Это рассуждение молчаливо предполагает *аддитивность* теплоты, или количества топлива.

В качестве стандартного вещества, которому при измерении сообщается теплота, выбрана вода, так как она доступна и легко перемешивается. Чтобы выяснить, не ограничено ли наше правило только водой, повторим опыты с 1 кг другого вещества, скажем алюминия или глицерина. Умножение *повышения температуры на массу материала*, как и в случае воды, дает завышенный результат (для алюминия ответ получается больше в 5 раз). Чтобы добиться того же эффекта теплоты с другим веществом, мы должны, как и для воды, сначала перемножить *массу и повышение температуры*, а затем помножить это на особое, характерное для данного вещества число (для алюминия около 0,2), называемое *удельной теплоемкостью*. Удельная теплоемкость — очень полезная характеристика при тепловых расчетах, но мы не будем рассматривать ее здесь подробно ¹⁾.

ДЕМОНСТРАЦИОННЫЕ ОПЫТЫ

Опыт 2. *Смешивание горячей и холодной воды.* Проверим наше правило измерения теплоты в опыте с горячей и холодной водой — одним из первых опытов, которые привели к

созданию методов измерения теплоты, или калориметрии.

Нальем 0,3 кг холодной воды в один сосуд и 0,4 кг горячей воды в другой — большой *тонкостенный* ²⁾

вни с общепринятой единицей массы, килограммом, пользуемся килокалорией, обозначая ее Калория, или сокращенно *Кал*. Когда говорят, что дневной рацион человека составляет 3000 *Кал*, это означает 3000 килокалорий.

¹⁾ Измерению удельной теплоемкости часто отводится большое место в школьных лабораторных работах. При этом поощряются неточные измерения с погружением кусков горячего металла в холодную жидкость, от чего отказались уже более полвека назад.

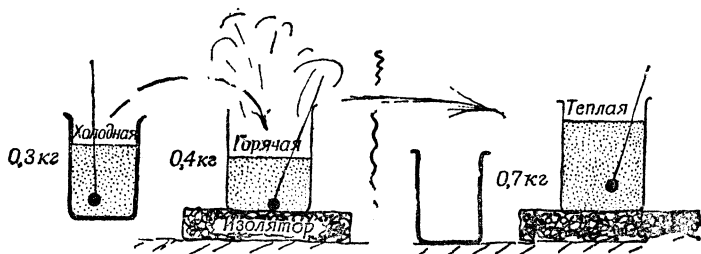
²⁾ Сосуд с толстыми стенками забирает слишком много теплоты. Еще лучше взять тонкий полиэтиленовый мешок.

сосуд. Тщательно перемешаем и измерим их температуры. Быстро выльем холодную воду в горячую, перемешаем и измерим окончательную температуру. В окончательной смеси холодная и теплая вода перемешались, но мы знаем, что их конечная температура — это температура $0,7$ кг воды. Если теплота не исчезает, то следует ожидать, что горячая теряет,

Это очень простые, грубые опыты, но они позволяют почувствовать масштаб Калории.

3) Если угодно, повторите опыты с различными массами воды или различными периодами нагревания. В последнем случае найдите количество тепла, подведенное за 1 мин.

4) Сожгите 1 см³ спирта под большим куском алюминия. Допус-



Фиг. 68. Опыт 3.

а холодная вода приобретает равные количества теплоты (со скидкой на потери теплоты). Вычислим *повышение температуры холодной воды и понижение температуры горячей. Равны ли они?* Конечно, нет, ибо температура сама по себе не является мерой количества *тепла*. Попробуем воспользоваться произведением

МАССА ВОДЫ · ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ.

Произведения не будут точно равны и противоположны, но это самое простое и удовлетворительное правило, и можно найти оправдание тому, что оно не выполняется совершенно точно.

Опыт 3. Измерение количества тепла.

1) Измерьте количество тепла, переданное кастрюле с водой при сжигании 1 см³ спирта.

2) Измерьте количество тепла, переданное кастрюле с водой бунзеновской горелкой за 1 мин работы.

кая, что спирт передает одинаковое количество тепла как алюминию, так и кастрюле с водой, оцените удельную теплоемкость алюминия.

Если хотите, исследуйте различные сорта пламени горелки: желтое, коптящее, спокойное, ревущее. Исследуйте также *температуру* разных сортов пламени, используя в качестве грубого индикатора кусочек железной проволоки или сгоревшую спичку.

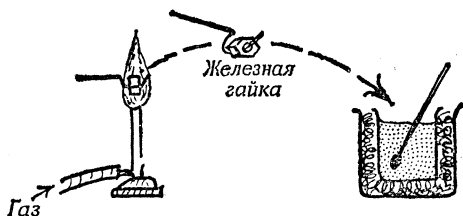
В расчетах можно либо рассматривать воду как единственный объект *полезного* нагревания, либо учесть теплоту, отдаваемую кастрюле. В этом случае надо знать удельную теплоемкость материала, из которого она сделана.

Опыт 4 (факультативный). Оценка температуры пламени на основе калориметрии. Наряду с измерением теплоотдачи бунзеновской горелки оцените *температуру* ее пламени. Для этого поместите кусок железа, скажем большую железную гайку

на железной проволоке, в пламя горелки. Когда гайка нагреется докрасна, бросьте ее в небольшую кружку с холодной водой (желательно с теплоизолирующим кожухом, чтобы ее можно было назвать «калориметром»). Тщательно измерь-

те начальную и конечную температуры. (Погружение гайки будет эффективной, но опасной операцией. Разумно сначала сделать грубые измерения, чтобы установить, сколько же нужно взять воды.)

Фиг. 69. Опыт 4.



Чтобы вычислить температуру пламени, познакомьтесь с задачей 1, а величину удельной теплоемкости железа возьмите из других опытов.

Задача 1. Оценка температуры пламени (аналогично опыту 4, в большем масштабе.)

Кусок железа массой 2 кг нагрет в печи и брошен в ведро, содержащее 30 кг воды с температурой $15,0^\circ\text{C}$. После перемешивания температура воды стала $25,0^\circ\text{C}$. Удельную теплоемкость железа в этой области температур примите равной 0,159.

- Вычислите количество тепла, полученного водой.
- Теплота, потерянная железом, равна

МАССА · УМЕНЬШЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ · УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ.

Подставьте в это выражение имеющиеся у вас данные.

- Предположим, что количество тепла, потерянного железом, равно количеству тепла, полученному водой. Вычислите изменение температуры железа.
- Какую температуру печи это дает, заниженную или завышенную. Почему?
- Будет ли такой опыт, но в большом масштабе более точным или менее точным, чем опыт в малом масштабе? Дайте обоснование вашего ответа. (Рассмотрите внимательно потери тепла.)

Опыт 5. Нагревание снега. (Если снега нет, то подойдет и измельченный лед.) Наполните снегом небольшую металлическую кружку. Поло-

жите в снег термометр и измерьте его температуру. Сообщите снегу некоторое количество тепла, сжигая под ним 1 см^3 спирта ¹⁾.

¹⁾ Вместо спирта можно воспользоваться пламенем небольшой бунзеновской горелки. В этом случае в качестве одной «порции» тепла можно принять нагревание в течение $\frac{1}{4}$ мин. Во время перемешивания и измерения температуры пламя следует убирать. Необходимо поддерживать постоянное горение, так как пламя легко сбить или упустить время. Проводить опыт гораздо легче, если каждые полминуты вам будут подавать сигналы.

Перемешивайте тающий снег до тех пор, пока показания термометра не начнут меняться. Запишите показание термометра. Сообщите затем кружке еще такое же количество тепла. Перемешайте содержимое кружки и измерьте температуру. Продолжайте делать так, пока вода не станет теплой или пока она не закипит. Очень важен перерыв после каждого нагрева, чтобы эффективное перемешивание успевало выравни-

вать температуру содержимого. На ранних стадиях на это потребуется минута или даже больше, потом хватит нескольких секунд, а в конце времени почти не потребуется. Нарисуйте график зависимости *температуры от количества тепла*. Какое заключение можно сделать из этого графика. (П р и м е ч а н и е. Можно надеяться на качественные и приближенные количественные выводы.)

Скрытая теплота

Опыт с нагреванием снега (или демонстрация, заменяющая его) показывает, что теплота не всегда ведет к нагреванию, иногда она тратится на плавление или испарение, причем в таких случаях температура не меняется. Мы считаем, что тепловая энергия уходит на отрыв молекул от твердого кристалла или на пополнение кинетической энергии, унесенной быстрыми испарившимися молекулами. «Пропавшее» тепло мы называем *скрытым*.

Опыты показывают, что для того, чтобы растопить 1 кг льда без изменения температуры, требуется 80 *Кал*. А чтобы превратить в пар 1 кг воды при 100° С, требуется 540 *Кал*. Список тепловых расходов для превращения в пар 1 кг льда, взятого первоначально при температуре, скажем, —10° С, выглядит следующим образом:

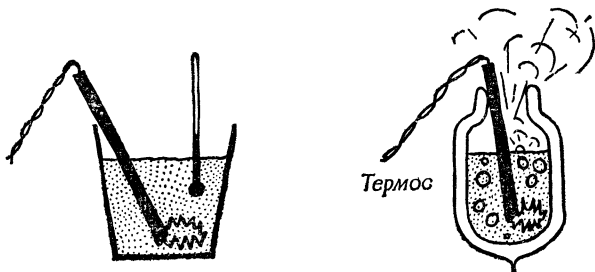
Нагревание льда до точки таяния (поскольку удельная теплоемкость льда = 0,5)	5 <i>Кал</i>
Плавление льда при температуре 0° С (превращение твердого тела в жидкость без изменения температуры)	80 <i>Кал</i>
Нагревание растаявшего льда до точки кипения	100 <i>Кал</i>
Выкипание воды при 100° С (без изменения температуры)	540 <i>Кал</i>

Обратите внимание, насколько трудно отрывать молекулы от жидкости и превращать ее в пар. Превращение льда в кипяток обходится в 185 *Кал*, а выкипание берет почти в 3 раза больше. При конденсации пара теплоты выделяется гораздо больше, чем при охлаждении горячей воды: *ожог паром гораздо тяжелее, нежели жаром кипятком*.

Задача 2. Теплота превращения воды в пар

Электрокипятильник, работая 2 мин, нагревает 10 кг воды в баке от 20,0 до 22,6° С. Тот же кипятильник при том же потреблении энергии был опущен на 2 мин в термос с кипящей водой. После этого термос, который вначале весил 2,000 кг, стал весить 1,950 кг.

- Сколько теплоты выделил нагреватель за 2 мин?
- Сколько воды выкипело?



Фиг. 70. К задаче 2.

- Оцените теплоту выкипания 1 кг воды ¹⁾.
- Каков, по-вашему, получится ответ на предыдущий вопрос — завышенный или заниженный? Почему?

Задача 3. Теплота конденсации пара

Бак содержит 5,00 кг воды при 18° С. Из большого кипятильника в бак через трубу поступает горячий пар и нагревает воду до 30° С. После этого в баке оказывается 5,10 кг воды.

- Какова масса сконденсировавшегося пара?
- Сколько теплоты получили 5,00 кг воды?
- Предположим, что холодная вода приобрела теплоту от пара, который сконденсировался и охладился до 30° С. Сколько теплоты выделит 1 кг пара при такой конденсации и охлаждении?
- Сколько теплоты выделит бы 1 кг воды при охлаждении от 100 до 30° С?
- Оцените теплоту конденсации 1 кг пара без изменения температуры.

¹⁾ При ответах на вопрос: «Сколько теплоты...?» формулируйте его так:

$$\text{Необходимая теплота} = (15 \text{ кг}) \cdot (35^\circ - 5^\circ) = (15) \cdot (30) = 450 \text{ Кал},$$

а не так:

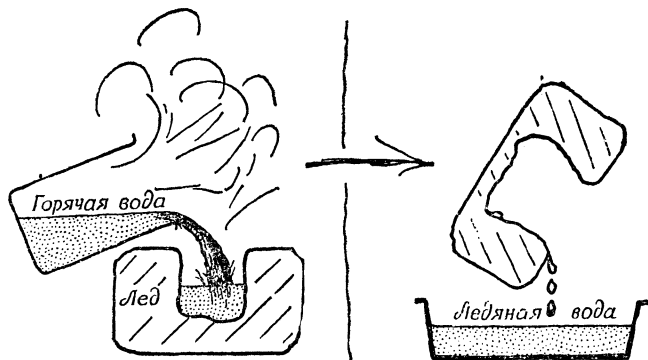
$$\text{Необходимое число Калорий} = 450.$$

Вы работаете с теплотой, и это нужно отметить с самого начала; Калории — только единицы теплоты, и они должны стоять в конце. Ведь вы не говорите вместо «мой рост 1,75 м» — «мой метраж = 1,75» или «мои метры = 1,75». Ставить единицы впереди — неграмотно, избегайте этого. Существуют, правда, некоторые исключения, пришедшие из профессионального жаргона, такие, как «вольтаж», «тоннаж», «метраж», но уж не «Калораж»!

- е) Будет ли эта ваша оценка завышена или занижена? (Рассмотрите две возможные причины: первая — потери тепла и вторая — капли воды, принесенные паром и включенные в вес пара, дают меньшее тепловыделение.)

Задача 4. Теплота плавления льда

В большом куске льда выдолблено углубление и внутренность осушена губкой. Быстро нальем туда 2,0 кг воды при температуре 50°C . Вода перемешивается до тех пор, пока не охладится до 0°C . Затем вся вода в углублении



Фиг. 71. К задаче 4.

тщательно собирается и взвешивается. Ее вес равен 3,25 кг. Сколько теплоты пошло на то, чтобы лед растаял? Сколько ее требуется для того, чтобы растаял 1 кг льда?

Теплота и энергия

Сжатие нагревает газ — сообщает ему теплоту, хотя, если вас спросят: «Что делает с молекулами движущийся поршень?», вы ответите: «Он просто заставляет их двигаться быстрее». Таким образом, теплота, по-видимому, связана с молекулярным движением в газе. Она появляется и в тех случаях, когда куют мягкий металл или трут друг о друга неровные поверхности. Во всех случаях теплоту можно приписать движению атомов и молекул. Тщательные измерения показывают, что механическая энергия и теплота взаимопревращаемы с фиксированным «обменным курсом». В результате мы приходим к выводу, что теплота — это одна из форм энергии. Исследованию теплоты и ее связи с другими формами энергии посвящена гл. 29.

II. ТЕМПЕРАТУРА

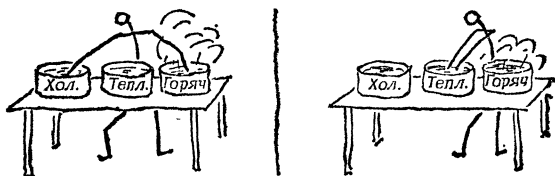
Термометры и температура

Вопрос «Что такое шкала температур?» — годится для любого физика — от студента до профессора. Полный ответ на него занял бы целую книгу и мог бы послужить хорошей иллюстрацией изменения взглядов и прогресса физики за последние четыре века.

Температура — это степень нагретости по определенной шкале. Для грубой оценки, без термометра, можно воспользоваться чувствительностью собственной кожи, но наши ощущения тепла и холода ограничены и ненадежны.

Опыт 6. Чувствительность кожи к теплу и холоду. Этот опыт весьма поучителен. Поставьте три тазика с водой: один с очень горячей, другой с умеренно теплой, а третий с очень холодной. Опустите минуты на 3

одну руку в горячий, а другую в холодный таз. Затем обе руки опустите в таз с теплой водой. Теперь спросите-ка каждую руку, что она «скажет» вам о температуре воды?



Фиг. 72. Что «скажут» руки?

Термометр точно говорит нам, насколько вещь горячее или холоднее; с его помощью можно сравнить степень нагретости разных предметов; пользуясь им вновь и вновь, мы можем сопоставить наблюдения, сделанные в разное время. Он снабжен *определенной неизменной, воспроизводимой шкалой* — характерной принадлежностью любого хорошего прибора. Способ изготовления термометра и сам прибор диктуют нам ту шкалу и систему измерений, которой мы должны пользоваться. Переход от грубых ощущений к прибору со шкалой — не просто усовершенствование нашего осознания. Мы изобретаем и вводим в употребление новое понятие — температуру.

Наше грубое представление о горячем и холодном содержит в зародыше понятие температуры. Исследования показывают, что при нагревании многие из важнейших свойств вещей изменяются, и для изучения этих изменений нужны термометры. Повсеместное распространение термометров в обиходе отодвинуло на второй план смысл понятия температуры. Мы считаем, что термометр измеряет температуру нашего тела, воздуха или воды в ванне, хотя на самом деле он показывает лишь свою собственную температуру. Мы считаем изменения температуры от 60 до 70° и от 40 до 50° одинаковыми. Однако никаких гарантий того, что

они действительно одинаковы, у нас, по-видимому, нет. Нам остается считать их одинаковыми по определению. Термометры все же полезны нам как верные слуги. Но действительно ли за их преданным «лицом» — шкалой скрыта Ее Сиятельство Температура.

Простые термометры и шкала Цельсия

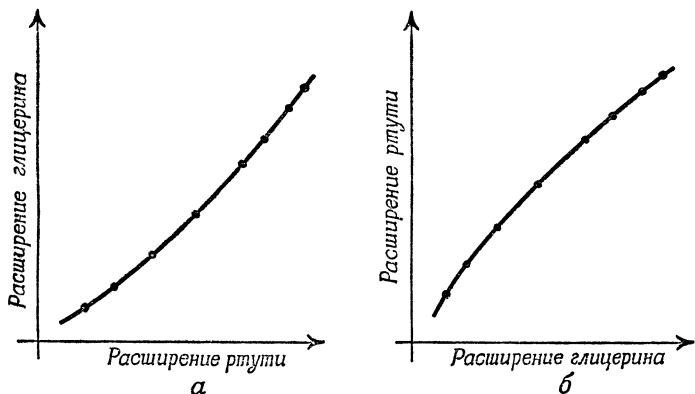
Температуру в термометрах показывает расширяющаяся при нагревании капиллярная жидкость (ртути или окрашенного спирта), помещенная в трубку с делениями. Чтобы шкала одного термометра совпадала с другой, мы берем две точки: таяние льда и кипение воды в стандартных условиях и приписываем им деления 0 и 100, а интервал между ними делим на 100 равных частей ¹⁾. Итак, если по одному термометру температура воды в ванне равна 30°, то любой другой термометр (если он правильно проградуирован) покажет то же самое, даже если у него пузырек и трубка совсем другого размера. В первом термометре ртуть расширится на 30/100 расширения от точки плавления до точки кипения. Разумно ожидать, что и в других термометрах ртуть будет расширяться в той же степени и они также покажут 30°. Здесь мы полагаемся на Универсальность Природы ²⁾.

Предположим теперь, что мы взяли другую жидкость, например глицерин. Даст ли это ту же шкалу при прежних точках? Конечно, для согласования со ртутным глицериновый термометр должен иметь 0° при таянии льда и 100° — при кипении воды. Но будут ли показания термометров совпадать при промежуточных температурах? Оказывается нет: когда ртутный термометр показывает 50,0° С, глицериновый термометр показывает 47,6° С. По сравнению со ртутным глицериновый термометр на первой половине пути между точкой таяния льда и точкой кипения воды немного отстает. (Можно сделать термометры, которые дадут еще большее расхождение. Например, термометр с парами воды показал бы 12° в точке, где по ртутному 50°!)

¹⁾ При этом получается так называемая шкала Цельсия, которая сейчас широко используется. В США, Англии и некоторых других странах применяется шкала Фаренгейта, на которой точки таяния льда и кипения воды помечаются цифрами 32 и 212. Первоначально шкала Фаренгейта строилась на двух других точках. В качестве нуля бралась температура замораживающей смеси, а числу 96 (число, распадающееся на большое число сомножителей и поэтому удобное в обращении) сопоставлялась нормальная температура человеческого тела. После модификации, когда стандартным точкам были сопоставлены целые числа, температура тела оказалась между 98 и 99. Комнатная температура 68° F соответствует 20° С. Несмотря на то что переход от одной шкалы к другой меняет числовое значение единицы температуры, он не затрагивает самой концепции температуры. Последнее международное соглашение ввело еще одно изменение: вместо стандартных точек таяния льда и кипения воды, определяющих шкалу, приняты «абсолютный нуль» и «тройная точка» для воды (см. гл. 30). Хотя это изменение в определении температуры — фундаментально, в обычную научную работу оно практически не вносит никакой разницы. Для тройной точки число выбрано так, что новая шкала очень хорошо согласуется со старой.

²⁾ Это рассуждение несколько наивно. Стекло ведь тоже расширяется. Действует ли расширение стекла на высоту столбика ртути? Что по этой причине, кроме простого расширения ртути, показывает термометр? Допустим, что два термометра содержат чистую ртуть, но шарики их сделаны из различных сортов стекла с разным расширением. Повлияет ли это на результат?

Какую же шкалу считать *правильной*? Какой термометр показывает *истинную* температуру? Давайте пока уклонимся от ответа на столь острые вопросы и разберемся, какой из термометров более *удобен* — ртутный, глицериновый или спиртовой. Удобнее всего ртутный, и тому есть ряд причин. Ниже описаны 8 особенностей ртути. Ваша задача — объяснить достоинство каждой из них. Достоинства первой особенности очевидны, седьмой — далеко



Фиг. 73. Сравнение расширения ртути и глицерина при нагревании (кривизна сильно преувеличена).

а — расширение глицерина по сравнению со ртутью, б — расширение ртути по сравнению с глицерином. Расширение одной жидкости можно рассматривать как предмет исследования, а расширение другой использовать для измерения температуры, но что здесь что? Как правильно распределить их роли?

не очевидны, как и недостатки восьмой особенности. Однако когда вы догадаетесь, в чем дело, то сразу же почувствуете, что это именно так. Ваше объяснение восьмой особенности можно проверить на ртутном термометре экспериментально.

Особенности ртути

Достоинства

- 1) Непрозрачна.
- 2) Остается жидкой в широкой области температур.
- 3) Трудно испарима при обычных температурах. (Спирт легко испаряется в области «больших» температур и конденсируется в области «малых». Что будет со спиртовым термометром, если опустить в теплую воду лишь его шарик?)
- 4) Имеет большой краевой угол со стеклом. (Что произойдет со спиртовым термометром, если его быстро охладить?)
- 5) Легко получается в чистом виде.
- 6) Это металл и, подобно другим металлам, обладает хорошей..?
- 7) При одном и том же повышении температуры *расширяется меньше* большинства жидкостей.

Недостатки

- 8) Слишком плотная.

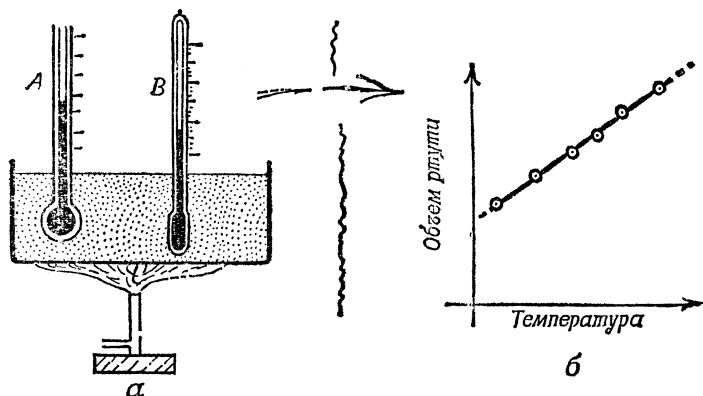
Задача 5

В чем состоят достоинства 1—7 особенностей ртути и чему мешает особенность 8?

В некоторых учебниках упоминается еще одно достоинство: *ртуть расширяется равномерно*. Это уже совсем ненаучное утверждение. Оно не то, что неверно само по себе, а просто бессмысленно. Догадаетесь ли, в чем здесь загвоздка? Рассмотрим опыт, который обычно ставится для проверки характера расширения.

Опыт 7. Прибор, измеряющий расширение ртути *A*, помещается в сосуд с водой (фиг. 74);

трубки, которая измеряет расширение; *B* — термометр, т. е. стеклянный шарик со ртутью и проградуирован-



Фиг. 74. Абракадабра.

он состоит из стеклянного шарика со ртутью и проградуированной

ная трубка, которая показывает температуру.

Послушный студент нагревал воду в сосуде, тщательно перемешивал ее, делал ряд отсчетов, строил график зависимости *расширения от температуры* и был удовлетворен, получив прямую линию. Ему следовало бы понять, что этот опыт не дает никакой информации о расширении ртути¹⁾, кроме подтверждения общего убеждения в Универсальности Природы.

¹⁾ Нелепость описанного способа измерения расширения ртути можно проиллюстрировать анекдотом об Абракадабре. Капитан одного корабля обнаружил, что его навигационный хронометр остановился. Тогда это была беда, ибо не существовало еще радиосигналов времени. Чтобы поставить свой хронометр точно по местному времени, пришлось зайти в порт Абрака-

Таким образом, мы не можем сказать, что одна жидкость дает «правильную» температурную шкалу, а другая — неправильную. Мы можем выбрать любую из жидкостей и объявить, что она, по соглашению, и будет давать стандартную шкалу.

При этом, однако, мы не можем утверждать, что получили истинную шкалу температур — ведь то же справедливо и по отношению к любой другой жидкости.

Но коль скоро нет «единственной» жидкости, то, может быть, нет и истинной температуры? На первый взгляд это обескураживает, но приводит к полезным выводам. Первый — практический: мы вправе остановиться на ртутном термометре. Он удобен в использовании, его легко изготовить и измерять он температуру в определенной шкале. С теоретической точки зрения мы выяснили, что температура, будучи нашим собственным изобретением, связана с прибором для ее измерения. Вновь и вновь мы приходим к тому, что понятия должны подразумевать способ их определения — к так называемому «операционному определению»; следует избегать романтического представления о том, что в основе лежит некое свойство природы, которое просто выявляется при таком подходе. Сравните это с различием между пространными рассуждениями философов о Правосудии, верой простых людей в единственность Правосудия и практическим подходом юристов к определению Правосудия посредством законов и их соблюдения.

Вам может казаться, что некоторые измерения в науке связаны с сущностью предметов и не нуждаются в операционном определении, но будьте

дабра. Капитан хотел узнать точное время, но в порту ему сказали: «Спросите у часовщика, что на окраине города. У него очень точные часы, он страшно гордится ими». Капитан понес свой хронометр к часовщику, который заверил его: «Можете вполне положиться на мои часы. Они ходят удивительно точно». Капитан поставил свой хронометр по часам мастера и для гарантии спросил: «А почему вы знаете, что ваши часы так точны?». «Я проверяю их по полуденному выстрелу пушки в таможне, и они идут секунда в секунду. Если же они врут, я подожгу их». Капитан был вполне удовлетворен. Он отправился со своим хронометром на корабль и собирался уж было отчаливать, но разговорился с таможенником и, чтобы еще раз убедиться, спросил его о пушке.

— У вас, говорят, есть пушка, которая стреляет в полдень?

— Да, сэр, есть.

— А выстрел дается около полудня или точно в полдень?

— Точно в полдень, сэр.

— Точно?

— Да, сэр, без сомнения.

— А откуда вы знаете, когда наступает точно полдень?

— О, сэр, будьте уверены, у нас на окраине города живет часовщик. У него очень точные часы п... .

Эта притча должна предостеречь вас от чего-то еще худшего, нежели порочный круг, — от порочной спирали. Вы можете счесть, что это предупреждение излишне, но с подобными заблуждениями вы столкнетесь не раз и даже в учебных курсах.

Рассуждения такого рода в нашей книге будут называться «абракадабрами». Да послужит это слово предупреждением. Если вам попадутся такие рассуждения, а их можно встретить почти в любом курсе, то вы имеете право процедить обидное «Абракадабра».

осторожны. Возьмите, например, площадь. Мы хорошо знаем, что такое площадь. Но несмотря на это, когда мы пытаемся определить площадь, например 6 м^2 , мы ловим себя на том, что начинаем рисовать сетку и считать квадратик или же, если вас предупредили, что это означает признание операционного определения понятий, вы начинаете говорить о том, сколько краски потребовалось бы для покрытия площади, но это также операционный подход, ибо кисть тоже инструмент.

До сих пор нам очень хотелось найти истинную температуру или более общую, более изначальную, чем температура, основанная на произвольном выборе ртути. Нечто похожее дает нам газовый термометр.

Газовый термометр измеряет температуру по расширению образца воздуха или другого газа или же по *увеличению давления* в фиксированном объеме (закон Бойля гарантирует нам их эквивалентность). Чтобы уменьшить трудности, связанные с расширением стекла, в качестве стандарта используют газовый термометр, ибо расширение газа в 20 раз больше, чем ртути, и тем самым влияние стекла сводится к минимуму. Кроме того, газовый термометр удобен и с методической стороны, так как все газы ведут себя практически одинаково. Показания термометров с различными газами практически идеально согласуются. Отказавшись от ртути в пользу газов, мы чувствуем, что приблизились к истинной температуре, если вы еще сохранили веру в нее ¹⁾.

Газовый термометр

На фиг. 75, а изображен термометр, который измеряет расширение газа. Капля ртути запирает в капилляре с запаянным концом объем сухого воздуха. При измерении необходимо погружать в среду весь термометр. Перемещение капли ртути в капилляре показывает изменение объема газа; на капилляре нанесена шкала с отметками 0 и 100 для точек таяния льда и кипения воды, как и у ртутного термометра.

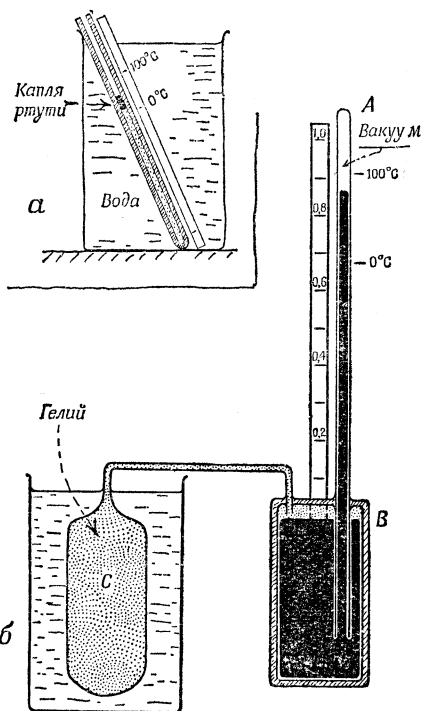
Такой термометр не годится для очень точных измерений. Мы хотим рассказать о газовом термометре, чтобы пояснить общую идею. Термометр такого типа показан на фиг. 75, б. Ртутный барометр АВ измеряет давление постоянного объема газа в баллоне С. Но вместо того чтобы отмечать высоту столба ртути в барометре в единицах давления, мы наносим на нем отметку 0, когда баллон помещен в тающий лед, и 100, когда в кипящую воду,

¹⁾ Многие утверждают, что операционный подход душит полет фантазии. Считают, что этот подход сделал бы науку очень правильной, но очень однообразной и затруднил бы прогресс. Макс Борн в своей небольшой книге «Физический эксперимент и физическая теория» говорит: «Название „операционный метод определения“ получил... общепринятый среди физиков подход. Он состоит в требовании, чтобы физические величины определялись не путем полного сведения к знакомым понятиям, а набором процедур, необходимых для получения и измерения этой величины. Это здравый подход — своего рода защита от пустословия и словесного фетишизма. Он очень полезен в классической физике, где имеют дело с непосредственно измеряемыми величинами..., однако операционное определение неуместно, если распространить представление о поле на атомные ядра и электроны. В квантовой теории он терпит неудачу».

и строим по ним всю шкалу Цельсия. Пользуясь законом Бойля, можно показать, что шкала у термометра, показанного на фиг. 75, б, должна быть такой же, как и у термометра на фиг. 75, а.

Применение газового термометра

При градуировке газового термометра, показанного на фиг. 76, мы погружаем баллон в тающий лед и наносим на шкалу барометра отметку 0. Затем повторяем всю процедуру, заменив лед кипящей водой; получаем отметку 100. Пользуясь определенной таким образом шкалой, строим график зависимости давления от температуры. (Если угодно, давление можно выражать в единицах высоты столба ртути.) Затем через точки 0 и 100 проводим прямую линию и, если необходимо, продолжаем ее. Это будет *прямая, определяющая температуру* в газовой шкале и дающая стандартные значения 0 и 100 в точках таяния льда и кипения воды. Теперь газовый термометр позволит нам измерить температуру, если мы знаем давление газа в баллоне при этой температуре. Пунктирная линия на фиг. 76 показывает, как найти температуру воды, при которой давление газа составляет 0,6 м ртутного столба.

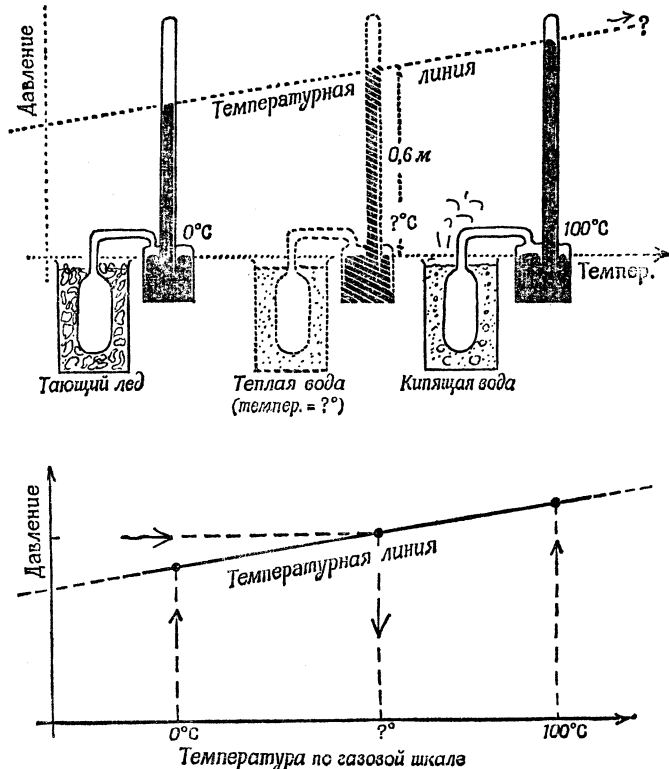


Фиг. 75. Газовый термометр.

а — в качестве меры температуры используется объем образца газа при атмосферном давлении; ртутная капля работает как поршень с ничтожным трением, удерживающий газ в узкой трубке; расстояние до закрытого конца служит мерой объема, а следовательно, и температуры; б — в качестве меры температуры используется давление газа (гелия), занимающего постоянный объем.

После того как мы выбрали газовый термометр в качестве стандарта, можно сверить с ним ртутный и глицериновый. Так было обнаружено, что расширение большинства жидкостей в зависимости от температуры, измеренной газовым термометром, несколько нелинейно. Показания термометров двух типов расходились между точками 0 и 100, согласие в которых получается по определению. Но ртуть, как это ни странно, дает почти прямую линию. Вот теперь можно сформулировать «достоинство» ртути: «По газовой шкале температур ртуть расширяется равномерно». Это удивительное совпадение показывает, что в свое время мы сделали очень удачный выбор — именно поэто-

му сейчас для непосредственного измерения температуры можно пользоваться обычными ртутными термометрами.

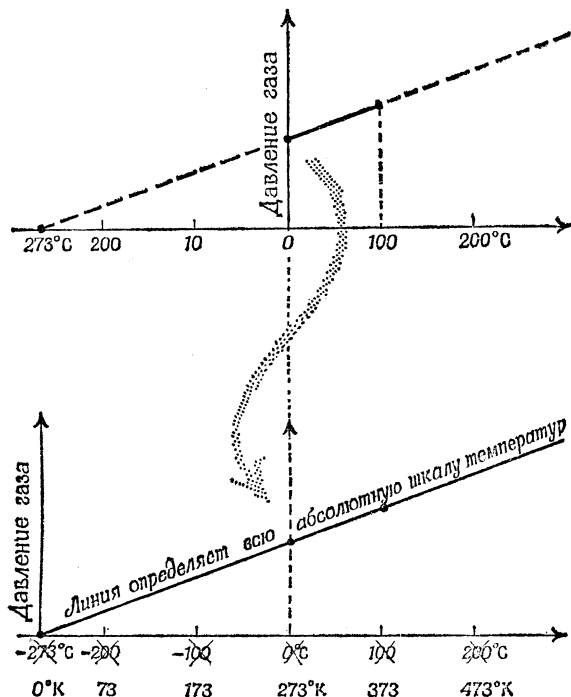


Фиг. 75. Газовая термометрия.

Абсолютная температура. Абсолютный нуль

Другое преимущество газового термометра — он указывает на наличие абсолютного нуля. Если мы охладим термометры, изображенные на фиг. 75, то в термометре *a* газ сожмется, а в термометре *b* давление упадет. Экстраполируя это поведение до еще меньших температур, мы наткнемся на *абсолютный нуль*, при котором газ приходит к нулевому объему в термометре *a* и нулевому давлению в термометре *b*. Если газы при уменьшении температуры действительно сохраняют свои свойства (чего на самом деле нет), нет надежды опуститься ниже абсолютного нуля или даже достичь его. Реальные газы превращаются в жидкости и затем в твердые тела раньше, чем охладятся до такой температуры, но это не мешает нам мечтать об абсолютном нуле как интригующем пределе. Его положение на обычной шкале Цельсия можно найти

путем экстраполяции прямолинейной температурной зависимости газового термометра. Тщательные измерения с реальными газами показали, что абсолютный нуль следует поместить на шкале Цельсия приблизительно при -273°C



Фиг. 77. Температурная шкала газового термометра.

a — температура газа в $^{\circ}\text{C}$ (по собственной шкале); *b* — абсолютная температура газа в $^{\circ}\text{K}$ (по собственной шкале).

независимо от сорта газа. Попытки достичь этой температуры любыми способами охлаждения позволили подойти к ней довольно близко, но достичь ее не удалось. Дело в том, что этот предел вообще недостижим.

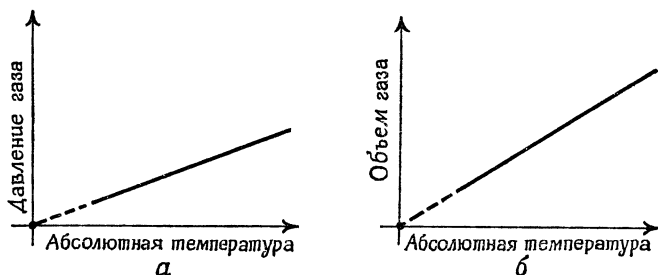
Те, кому приходится вычислять объем газа при какой-то фиксированной температуре из измерений, проведенных при других температурах ¹⁾, исполь-

¹⁾ Например, в химии измерение объема газов — одно из наиболее простых, но важных измерений. Газ — податливая штука. Объем газа, образовавшегося в эксперименте, зависит не только от масс компонент реакции, но и от его давления и температуры. Чтобы вычислить массу газа (воспользовавшись стандартной плотностью) или чтобы сравнить объемы газов, полученных в разных экспериментах, следует сначала охладить газ (мысленно) до стандартной температуры 0°C и найти объем, который он занял бы при этом, а затем по закону Бойля привести объем к стандартному давлению.

зуют эту прямую линию, проходящую через абсолютный нуль, чтобы свести задачу о расширении газа к простой пропорции наподобие следующей. Берем график температурной зависимости и перерисовываем его в новых осях с началом координат при -273°C . Теперь температура отсчитывается, начиная с нуля в новом начале координат (это будет теперь «абсолютный нуль», или -273°C). Новую температуру, отличающуюся от старой на 273° , мы назовем «абсолютной». Так мы отодвинули начало (но не сам график) на 273 единицы влево. Теперь наша прямая линия проходит через начало координат графика, где давление отложено по вертикальной оси, а абсолютная температура — по горизонтальной.

Давление газа, p , изменяется пропорционально абсолютной температуре T . Для любых двух температур T_1 и T_2 : $\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$.

Воспользовавшись газовым термометром (фиг. 75, а) или законом Бойля, мы находим, что для объемов V_1 и V_2 при постоянном давлении $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$. Этот закон верен для газов в области обычных температур, причем автоматически, ибо прямая линия проведена именно для определения температуры.



Фиг. 78. Зависимость давления газа (объем постоянен) от абсолютной температуры (а) и зависимость объема газа (давление постоянно) от абсолютной температуры (б).

Если считать, что эта зависимость имеет место как при очень низких, так и при очень высоких температурах, то обнаружится, что разные реальные газы дают разные шкалы. Таким образом, мы должны вообразить идеальный газ — «излюбленный трюк теоретического мышления» — и пользоваться им для определения универсальной шкалы температур от абсолютного нуля до сколь угодно больших. При обычных температурах идеальный газ похож на большинство реальных, но не проявляет характерных особенностей своих «младших братьев», типа CO_2 , и продолжает следовать простым законам поведения газов даже тогда, когда реальные газы начинают отходить от него и даже сжижаться ¹⁾.

¹⁾ В большинстве учебников приводится закон Гей-Люссака, который утверждает, что все газы расширяются одинаково и равномерно, а объем их пропорционален абсолютной температуре. Он собирает воедино все экспери-

Кинетическая теория и газовая температура

Кинетическая теория, которой мы верим благодаря успеху ее предсказаний, утверждает, что *давление газа* должно изменяться пропорционально *средней кинетической энергии*. Поскольку в газовой температурной шкале давление пропорционально абсолютной температуре, то, комбинируя эти два соотношения, получаем

КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ МОЛЕКУЛ $\sim$ АБСОЛЮТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА.

Поэтому температура приобретает простой смысл:

Абсолютная температура измеряет среднюю кинетическую энергию молекул газа ¹⁾.

Общее понятие температуры

Наше понятие температуры приобрело теперь более определенные контуры. Но из опасения, что оно покажется слишком простым и вы будете догматически утверждать, что «настоящая температура — это средняя Кинетическая Энергия молекул», мы остановимся на обсуждении общего определения. Говоря по совести, мы не знаем, что такое температура, и, по-видимому, никогда не узнаем больше того, что она определена на основе избранной нами процедуры измерения ²⁾. Итак, выберем в качестве меры температуры произвольную физическую величину, которая обнаруживает разумные измене-

ментальные факты, которыми мы уже пользовались, а именно *все газы кривоят к одному и тому же абсолютному нулю — 273° С*, если на графике зависимости объема газа от температуры продолжить прямую, проходящую через точки кипения воды и таяния льда до пересечения с осью температуры. Другими словами, при изменении температуры от одной данной точки до другой объем всех газов изменяется в одно и то же число раз. Но закон Гей-Люссака говорит еще, что расширение равномерно. Из наших рассуждений следует, что это имеет двойкий смысл:

- 1) Газы расширяются равномерно, если температуру измерять ртутным термометром. Это экспериментальный факт, связанный скорее с удачным выбором ртути.
- 2) Газы расширяются равномерно, если температуру измерять газовым термометром. Тогда это будет необходимым следствием определения газовой шкалы температур. Провозглашение его экспериментальным фактом есть абракадабра.

Закон Гей-Люссака должен включить либо первую, либо вторую точку зрения. Смешивать их непозволительно.

¹⁾ Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы (см. гл. 30) позволяет распространить это утверждение и на другие частицы: молекулы и атомы жидкостей и твердых тел. Однако при учете других движений, таких, как колебания (а для атомов в твердом теле это просто необходимо), возникают квантовые ограничения, которые сильно меняют всю картину.

²⁾ Мы знаем, что температура газового термометра — это мера Кинетической Энергии молекул, но это отнюдь не означает, что подобная температура — «истинная». Она появилась, когда мы выбрали газовую шкалу.

ния при охлаждении и нагревании¹⁾. Измерим эту величину при таянии льда и кипении воды, отложим измерения на графике в точках 0 и 100° С (или 273 и 373° абсолютной температуры), а затем проведем через эти точки прямую, определяющую шкалу температур. Пользуясь таким графиком, можно находить температуру по этой шкале.

Первые создатели термометров выбирали в качестве физического свойства сначала объем образца воды, затем спирта, а потом ртути. Позднее же остановились на давлении образца *газа*. Можно также воспользоваться электропроводностью, термоэлектричеством, разностью расширения двух металлов и т. д. Все это действительно используется, но во вторичных термометрах, не предназначенных для определения температурной шкалы. Шкала таких термометров калибруется путем сравнения со ртутным, который в свою очередь градуируется по газовому термометру.

При выборе физической величины критерием служит удобство проведения точных измерений, и страстно желанию найти истинную температурную шкалу суждено оставаться неудовлетворенным, если не обнаружится какого-либо универсального поведения, свойственного *всем*, а не только отдельным веществам (типа ртути) или газам. Самое удивительное, что это возможно. Сто лет назад Кельвин, изучая свойства идеальной тепловой машины (прародителя всех паровых машин, турбин и т. д.), придумал шкалу температур, взяв в качестве меры температуры нагревателя количество тепла, отбираемого такой машиной от нагревателя. На первый взгляд такая шкала не кажется ни слишком многообещающей, ни удовлетворительной, но она обладает замечательным свойством. Прежде всего шкала будет одной и той же независимо от конструкции машины и рабочего вещества (при условии, что машина идеальная, т. е. без трения и тепловых потерь из-за теплопроводности и т. п.). Хотя такую машину нельзя сделать, ее нетрудно вообразить благодаря простым и ясным условиям работы такой идеальной машины. Ее к.п.д., или, иначе говоря, эффективность превращения теплоты в полезную механическую работу (когда она работает как паровая машина), выше, чем у любой реальной машины. Но удивительно не это, а то, что к.п.д. не зависит от устройства и рабочего вещества машины. Кельвин и др. доказывали эту независимость с помощью остроумных мысленных экспериментов. Основываясь на величине к.п.д. (который, конечно, зависит от количества тепла, отбираемого от нагревателя), Кельвин построил «абсолютную термодинамическую шкалу температур». Наконец-то появилась шкала, не зависящая от индивидуальных свойств вещества! И что же, ученые признали ее за это? Ничуть. Ее приняли и используют теперь в качестве стандарта по совершенно другой причине — ввиду ее необычайной полезности. (Кроме того, она согласуется со шкалой газового термометра, что также облегчило ее признание!)

В «цилиндр» такой идеальной машины можно помещать самые различные вещества и, наблюдая за ее к.п.д., получить возможность замечательно предсказывать свойства выбранного вещества. Получаются удивительные и очень полезные соотношения. Так, если в цилиндр поместить смесь льда и воды, то полученное уравнение выразит изменение точки таяния льда, приходящееся на атмосферу давления, через плотность льда, плотность воды, теплоту, обеспечивающую таяние 1 кг льда, и температуру T таяния. Изменение точки плав-

¹⁾ Например, ртуть годится вполне, а вода нет, так как в интервале от 0 до 100° С она сперва немного сжимается от 0 до 4° С, а затем сильно расширяется. Водяной термометр давал бы «неоднозначные» показания.

ления трудно измерить экспериментально, а теперь можно вычислить по четырём другим легко измеримым величинам! Можно «заполнить цилиндр» излучением, тогда уравнение скажет нам, что *поток излучения* от нагревателя пропорционален T^4 , где T — абсолютная температура в новой шкале. (Эта формула полезна для измерения температуры Солнца.) Поместив в цилиндр рой электронов, можно найти соотношение, которое полезно для расчета радиоламп! Подобная игра с воображаемым помещением в цилиндр различных веществ и получением полезных соотношений для них носит название *термодинамики*. С помощью термодинамики получаются результаты, важные для техники, химии, атомной физики и астрономии. Однако *все результаты выражены через температуру в собственной шкале термодинамики* — абсолютной термодинамической шкале Кельвина. Эти результаты были бы бессмысленными, если бы не открытое Кельвином совпадение шкалы идеальных машин со шкалой газового термометра. Поэтому в качестве стандарта и в целях практической точности мы пользуемся теперь газовыми термометрами и все термодинамические предсказания выражаем именно в этой шкале. В честь Кельвина комбинация шкалы идеальных машин и газовой шкалы названа шкалой Кельвина и обозначается $^{\circ}\text{K}$. Итак, после долгих безнадежных попыток найти абсолютную температуру наш корабль бросил якорь в твердый грунт универсальности.

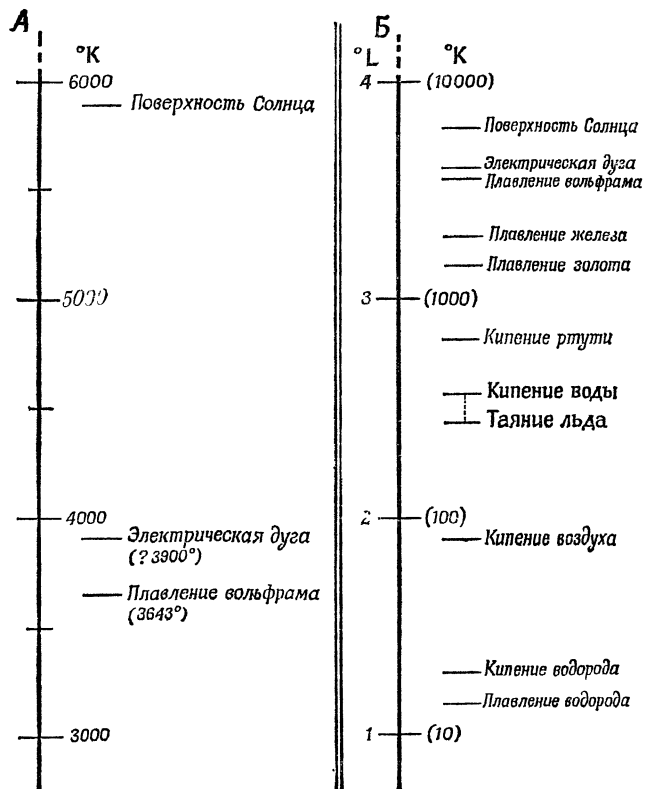
Интересные температуры

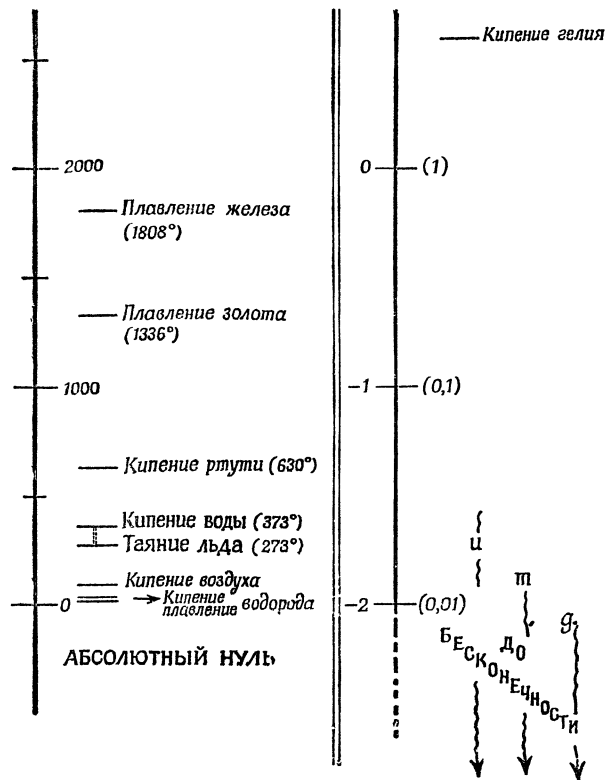
На фиг. 79 на столбце *A* отмечены некоторые интересные температуры в градусах Кельвина. Очень низкие температуры здесь как бы сгрудились около абсолютного нуля. Такого сгущения и обрыва температур у 0°K удастся избежать применением логарифмической шкалы (столбец *B*).

Для большинства людей *абсолютный нуль*, когда они впервые сталкиваются с ним, кажется странным ограничением, а некоторых он просто раздражает. Шкала Кельвина дает тот же абсолютный нуль, что и газовая, но термодинамические рассуждения показывают, что мы вряд ли сможем надеяться достичь его. Температур ниже абсолютного нуля либо не существует совсем, либо они не имеют обычного смысла ¹⁾. Это ограничение кажется парадоксальным, но парадокс исчезает, когда мы пытаемся экспериментально достичь очень низких температур. Чтобы охладить материал от 100 до 10°K (т. е. примерно от температуры жидкого воздуха до температуры жидкого водорода), требуется много труда и денег. Столько же требуется и для охлаждения его еще ниже, от 10 до 1°K , столько же для охлаждения от 1 до $0,1^{\circ}\text{K}$ и от $0,1$ до $0,01^{\circ}\text{K}$, так что с точки зрения растущей стоимости абсолютный нуль кажется практически недостижимым.

В этой истории стоимости мы учли и усовершенствования, которые могут уменьшить трудности. Но почему бы вместо чисел $100, 10, 1, 0,1, \dots$ не использовать какие-то другие, более показательные в смысле равномерности трудностей? Можно, взяв логарифм, одинаковые *множители* $1/10$, превратить в одинаковые *шаги*, т. е. брать $\lg 100, \lg 10, \lg 1, \lg 0,1$ и т. д., которые равны $2, 1, 0, -1$ и т. д., когда в старой шкале температура все меньшими и меньшими шагами подползает к нулю, а логарифм все дальше и дальше бесстрашно

¹⁾ В последнее время были придуманы отрицательные абсолютные температуры. Для обычной термодинамики они остаются бессмыслицей, но приобретают реальный смысл в пограничной области, где электроника встречается с квантовой механикой.





Фиг. 79. Шкала температур.

А — абсолютная (Кельвина); Б — логарифмическая.

опускается вниз: 2, 1, 0, —1, —2, —3 и т. д. до минус бесконечности. Старый «абсолютный нуль» будет теперь «минус бесконечностью» и кажется совсем недостижимым. Именно эта логарифмическая шкала, в которой так удобно размещаются очень низкие температуры, изображена на столбце *В* фиг. 79.

Но вправе ли мы использовать логарифм в качестве указателя температуры? А на каком основании мы на нашем исходном графике температур брали просто давление? Мы же могли взять и $(\text{давление})^2$ и $\sqrt{\text{давления}}$ или, как сейчас, $\lg(\text{давления})$. Сделано это было исключительно из соображений простоты и удобства. Мы и сейчас продолжаем основываться на *давлении*. Логарифмическая шкала не используется нами, а нарисована здесь просто чтобы помочь вам в ваших размышлениях над температурой.

Температура — искусственное понятие

Вернемся теперь к нашим рассуждениям о температуре. Начав с грубой идеи и ощущений, мы пришли к определенному понятию температуры, предписав способ ее измерения. На первый взгляд все это выглядит так, как будто бы и шкала, и все прочее — не прочная наука, а лишь плод нашего воображения. Между тем это не так. Мы можем изготовлять настоящие термометры и с пониманием и пользой применять их. Мы можем создавать теоретические системы и получать хорошие предсказания на языке определенной шкалы. И все же сама температура или ее выбор остается концепцией нашего ума с возможностью любого выбора температурной шкалы. Далеко не все физические величины, которые мы измеряем и которыми пользуемся в науке, выглядят столь искусственно. Некоторые кажутся очевидными, давно известными. Способов их измерения подсказывает нам здравый смысл. Возьмем, например, *длину*. Имеется ясное представление о длине и нет нужды в ее научном определении. Единицы измерения, конечно, произвольны, и это иногда приводит к путанице из-за плохого определения единиц длины, но как только единицы установлены, процесс измерения длины кажется очевидным. Таких величин, которые сама Природа обеспечила системой измерения (наподобие длины), довольно много: *площадь*, *число* пальцев, возможно, *плотность*, по-видимому, *вес*. Но некоторые критикуют эту точку зрения, заявляя, что *все* измерения заключают в себе неявные предположения и определения. По их мнению, все понятия, лежащие в основе измерения, должны быть, подобно температуре, плодом нашего собственного изобретения.

С термометром на ракете

На прощание несколько слов об одном практическом вопросе. Межконтинентальные путешествия будут происходить на ракетах. Ракетные корабли с большой скоростью будут двигаться в атмосфере Земли, причем большая часть пути будет приходиться на разреженную атмосферу и снижаться корабли будут в точке назначения. *Какова же будет температура внутри корабля во время полета?* Она будет зависеть от внешних условий и системы кондиционирования воздуха. Какова будет температура снаружи? На промелькнувшем в иллюминаторе термометре, подвешенном на воздушном шаре, будет очень низкая температура (особенно если термометр защищен от солнечного света), вероятно, что-то вроде —50° С. На прикрепленном снаружи термометре, движущемся вместе с кораблем, температура будет около 10 000° С. Почему?

В популярных журналах и даже многих популярных книгах о науке слова СИЛА, ЭНЕРГИЯ и МОЩНОСТЬ пользуются как эквиваленты, причем в «сомнительных случаях» предпочтение отдается слову МОЩНОСТЬ. Столь неярashливое словоупотребление при общем великом техническом прогрессе создает в головах читателей (и самих писателей) путаницу между этими тремя совершенно различными научными понятиями.

Мощность — это *скорость* передачи энергии:

$$\text{МОЩНОСТЬ} = \frac{\text{ПЕРЕДАННАЯ ЭНЕРГИЯ}}{\text{ВРЕМЯ}} = \frac{\Delta E}{\Delta t}.$$

Энергия проявляется во многих формах, и ее переходы с одного места на другое или из одной формы в другую имеют для нас огромное значение. Плата за энергию — важнейшая статья наших расходов, поэтому мы должны знать, каков переход энергии, и мерой этого служит произведение *сила на расстояние* в разнообразных единицах: *джоулях*, *кГм* и т. д. Чтобы осуществить такой переход, нам нужны машины: бензиновый двигатель, паровая турбина, электромотор, фейерверк, человеческое тело. Машины осуществляют нечто большее, нежели простой перенос энергии с одного места на другое, как в случае системы блоков, гидравлических прессов, рычагов ¹⁾. Но нам еще хочется знать, *насколько быстро машина передает* (или может передавать) *энергию*. Здоровый человек, например, *каждую секунду* переводит из химической формы в механическую около *7 кГм* энергии, полученной в виде пищи, когда он поднимает грузы. Такая способность может поддерживаться в течение нескольких часов. Если же он попытается работать в 10 раз быстрее, т. е. будет превращать каждую секунду из химической формы в механическую *70 кГм* энергии, то сможет работать так не более нескольких минут. Чем бы его ни кормили,

¹⁾ Поток горячего воздуха тоже «машина».

человек вскоре так устанет, что уже не сможет продолжать работу. Если же он попытается работать еще быстрее (скажем, 700 кгм за секунду), то из этого просто ничего не выйдет, его мышцы откажутся выполнять работу с такой скоростью. Паровые машины, когда их заставляют работать слишком быстро, становятся более расточительными. Электромоторы, мало потребляющие на холостом ходу, очень эффективны при средней нагрузке и останавливаются с воем при перегрузке. Вообще каждая машина имеет предел скорости, с которой она может превращать энергию. Ниже этого предела обычно имеется область оптимальных рабочих скоростей, которая должна быть известна тем, кто эксплуатирует машину.

При постоянной работе любой «машины» (например, электромотора, электролампы или паровой машины) скорость превращения энергии говорит, как часто придется оплачивать счета за электроснабжение или топливо. На каждом электроприборе (лампах, кипятильниках и т. д.) проставлена скорость потребления энергии, т. е. сколько они потребляют энергии не вообще, а в секунду, и в соответствии с этим мы производим наш выбор. Эту скорость превращения энергии мы и называем *мощностью* ¹⁾.

Единицы мощности

Передачу энергии мы измеряем в *ньютон-метрах* (т. е. в джоулях), а *время*, необходимое для передачи, — в *секундах*; следовательно, *мощность*, или *передачу энергии/время*, — в *ньютон-м/сек*, или *дж/сек*.

Один *дж/сек* — очень полезная единица, поэтому ей дано собственное имя — *ватт (вт)*. Однако это лишь другое название. Никаким экспериментом нельзя доказать, что 1 *вт* равен 1 *дж/сек*, поскольку это верно по определению. В качестве более крупной единицы мы используем 1 *киловатт (1 кВт)*, который равен 1000 *вт*. Здоровый мужчина, избегая по лестнице или влезая по

¹⁾ Часто говорят, что мощность — это скорость потребления энергии или скорость *снабжения* энергией. Строго говоря, энергия никогда не исчезает и никогда не создается из ничего, а только переходит из одной формы в другую. Тем не менее, вспоминая об оплате счетов за электроэнергию, мы, естественно, думаем об одностороннем обмене и говорим о *потреблении* или о *снабжении* электроэнергией. Говорят также, что мощность — это «скорость, с которой совершается работа». В нашем курсе работа рассматривается не как форма энергии, а лишь как свидетельство ее превращения. С этой точки зрения слово «совершение», как и слово «потребление», не годится, правильное было бы говорить «*мощность — это скорость работы*».

веревке, может в течение нескольких секунд превращать химическую энергию в потенциальную энергию со скоростью 1 *квт*. Мощный электронагреватель, пока он включен, может превращать электрическую энергию в тепло со скоростью 1 *квт*. Если энергия измеряется в 1 *кГм*, то в качестве единицы мощности мы берем 1 *кГм/сек*. Измерения показали, что сильная лошадь, поднимающая грузы, способна в течение значительного времени превращать энергию своего питания в полезную механическую энергию со скоростью 75 *кГм/сек*. Эта скорость стала основой технической единицы мощности «1 лошадиная сила» (1 *л. с.*), определяемой как 75 *кГм/сек*. Ее величина фиксирована, хотя лошади бывают разные и большинство из них не может работать в таком темпе.

Прогресс паровых машин от первого промышленного применения в 1700 г. и почти до современного вида, которого они достигли к 1800 г., в значительной степени обязан работам Джемса Уатта (Watt). Вот почему единица мощности названа его именем ¹⁾. Уатт ввел в качестве единицы мощности лошадиную силу в те времена, когда лошади приводили в движение насосы, железнодорожные вагоны и другие механизмы. Как правило, эта единица неудобна, но ею пользуются до сих пор, за исключением того случая, когда предусмотрительный заказчик задает вопрос: «Если я куплю одну из ваших машин, сколько она заменит лошадей?».

Задача 1. Лошадиная сила (л. с.)

Лошадь, с которой экспериментировал Уатт, передвигаясь со скоростью 6 м/мин, тянула веревку, которая через блок шла к грузу весом 68 кГ, опущенному в шахту.

- а) Покажите, что эти измерения приводят к уаттовской единице л. с., равной 75 кГм/сек.*
- б) При непрерывной работе эта единица переоценивает лошадиные возможности. Была ли в этой связи мощность одной из первых машин Уатта, равная 3 л. с., больше или меньше буквального номинала?*

Ниже мы приводим список единиц энергии и соответствующие им единицы мощности:

<i>Энергия</i>	<i>Мощность</i>
1 джоуль (дж)	1 дж/сек = 1 <i>вт</i>
1 килограмметр (кГм)	1 <i>кГм/сек</i>
1 киловатт-час (<i>квт·ч</i>)	1 <i>л. с.</i> = 75 <i>кГм/сек</i> 1 <i>квт</i> = 1000 <i>вт</i>

¹⁾ Конечно, следовало бы единицу мощности назвать «уатт», а не «ватт», но традицию не изменишь.— *Прим. перев.*

Задача 2

- а) Покажите, что $1 \text{ дж} \approx \frac{1}{10} \text{ кГм}$.
б) Покажите, что 1 л. с. равна примерно $\frac{3}{4} \text{ квт}$. Приняв 75 кГм/сек за 1 л. с. , найдите её величину в ваттах. (Выразите 75 кГ в ньютонах и 75 кГм в джоулях.)

Задача 3

Альпинист весом 75 кГ за 10 сек поднимается вертикально вверх по веревке на высоту 6 м .

- а) Какую он приобретает потенциальную энергию?
б) Какова его полезная мощность, т. е. скорость, с которой химическая энергия превращается в полезную потенциальную энергию? Выразите её в л. с. и в квт.

П р и м е ч а н и е. Инженеры часто говорят о «лошадиных силах» машины или даже человека, имея в виду мощность, выраженную в л. с. Это вульгаризация наподобие «быстроты скорости»; таким способом бывает полезно выражать максимальную мощность, развиваемую машиной.

Коэффициент полезного действия (к. п. д.)

Вычисленная в задаче 3 мощность — это скорость увеличения потенциальной энергии человека, которую он может затем использовать с помощью веревки и колес для выполнения некоторой работы, скажем поднимания кирпичей. Взявшись за веревку, человек превращает запас своей химической энергии в потенциальную, но мощность, с которой он высвобождает химическую энергию, оказывается гораздо больше, так как при этом выделяется еще значительное количество тепла. Количество израсходованной химической энергии можно установить, собрав выдыхаемый альпинистом воздух и измерив его объем и содержание CO_2 .

Эти данные позволяют вычислить потребность в питании, что в свою очередь может характеризовать полную мощность, развиваемую при подъеме. Для любой машины отношение *полезной мощности на выходе к полной мощности на входе* называется *коэффициентом полезного действия* (сокращенно к. п. д.). Альпинист, поднимающийся по веревке, по-видимому, растрчивает большую часть своей энергии в виде тепла. Если рассматривать альпиниста как машину для поднятия груза (самого себя) за счет энергии питания, то к. п. д. его, по-видимому, очень мал.

Задача 4

Физиологические измерения показывают, что поднимающийся по канату альпинист *вытравчивает* дополнительно энергию в виде тепла (сверх обычной потребности) со скоростью по меньшей мере 220 кГм/сек . Приняв эту оценку, вычислите его к. п. д. (Это неточный расчет, так как для поддержания жизне-

деятельности рацион питания человека рассчитывался на 24 часа. Поскольку при дополнительном рационе он поднимается по веревке лишь малую долю времени из 24 часов, то его общий к п.д. будет гораздо меньше. Если сравнить человека, занятого тяжелым ручным трудом, с человеком, не занятым им, то окажется, что первому требуется дополнительное питание, причем в 3—6 раз больше, чем, казалось бы, требует выполняемая работа. К.п.д. человека при выполнении работы за счет дополнительного питания в лучшем случае составляет 25%.)

Электромотор берет из электрической сети большую мощность, нежели отдаст приводимому в движение механизму. Разница связана с выделяемым в моторе теплом. К.п.д. большого мотора может составлять до 90%. Электромотор — это искусный передатчик энергии. При малой нагрузке он потребляет из сети малую мощность. Если же его нагрузить, то он, продолжая вращаться с той же скоростью, соответственно потребует большую мощность. Полезную мощность мотора можно измерить механически, а полную мощность найти из показания вольтметра и амперметра. Позднее мы покажем, что при определенном способе присоединения амперметра и вольтметра мощность на входе в ваттах ¹⁾ находится из произведения

$$\frac{\text{ПОКАЗАНИЕ АМПЕРМЕТРА} \cdot \text{ПОКАЗАНИЕ ВОЛЬТМЕТРА}}{(\text{в амперах}) \quad (\text{в вольтах})}$$

Для лабораторных работ считайте, что эта формула правильна. Более подробно о ней мы скажем позднее.

Животным свойственна большая способность к перегрузке, но, с другой стороны, они очень экономичны при малой нагрузке. В течение короткого времени лошадь можно заставить давать больше 1 л. с. А если она работает каждый день, но с затратой долей лошадиной силы, то ей соответственно будет требоваться меньше корма.

Мощность в человеческой деятельности

В приведенной ниже табл. 3 даны результаты измерения скорости превращения химической энергии здоровым человеком при различных видах деятельности. Они получены измерением выделяемого CO_2 , так что представляют общий расход питания, а не просто «полезную мощность».

¹⁾ Мощность электрических машин обычно измеряется в ваттах, поэтому большинство считает, что ватт — электрическая единица. Это не так. Ватт — единица мощности, применимая к любым машинам и любым превращениям энергии.

Скорость превращения питания

Виды деятельности	Кал/час	Кал/мин	Ватт
Низший уровень жизнедеятельности (сон)	От 60 до 80		80—95
Спокойный отдых сидя	От 95 до 115		110—135
Спокойный отдых стоя	От 115 до 125		270
Ходьба	230	3,8	520
Быстрый бег		От 8 до 12	700
Плавание		9	630
Игра в футбол		11	770

Составляя расписание «типичного дня», мы с помощью этих данных можем найти полную потребность в питании. Она весьма индивидуальна. Для энергичного здорового студента она составляет от 3300 до 4900 *Кал/день*, а для студентки — 3000—3300 *кал/день*. Вычисленный из этих данных дневной рацион должен соответствовать полной затрате топлива в виде питания за тот же период. Это проверялось путем взвешивания пищи и измерения «топливного эквивалента» этой пищи. Допуская 5%-ную потерю пищи — топлива, получали, что дневной рацион на 1—8% превышает потребление энергии, найденное по выделению CO_2 . Для столь сложных измерений это прекрасное согласие.

Тяжелая физическая работа вызывает необходимость в дополнительном питании. Вот данные для заводских рабочих США.

Чтобы увидеть, на что способен человек, возьмем из табл. 4 найденные для тяжелой работы 410 *вт*, вычтем из них 90 *вт* низшего уровня (см. табл. 3), тогда на саму работу останется 320 *вт*. Примем, что к. п. д. рабочего 25% (цифра довольно оптимистическая). Тогда *полезная* мощность составляет 25% от 320, или 80 *вт*. Таким образом, одного человека, если он будет получать достаточное питание, хватит лишь на то, чтобы крутить генератор для питания 80-ваттной лампочки (в течение 8-часового рабочего дня). Некоторые люди способны постоянно выдавать по 100 *вт*, другие же — меньше 80 *вт*. Для цивилизаций, в которых сила раба использовалась как основной двигатель в строительстве и т. п.,

Таблица 4

Скорость превращения энергии

Заводской рабочий (при 8-часовой ра- боте)	Кал/час	Ватт
На легкой ручной работе	190	220
На средней руч- ной работе	250	290
На тяжелой руч- ной работе	350	410

мощность одного человека можно было бы считать равной 90 *вт*, или $\frac{1}{8}$ л. с.

Задача 5

Какой мощности лампочку мог бы обеспечить человек, работая ежедневно от 4 часов дня до полуночи, если бы он крутил подходящий генератор, к. п. д. которого при превращении механической энергии в электрическую составляет 80%?

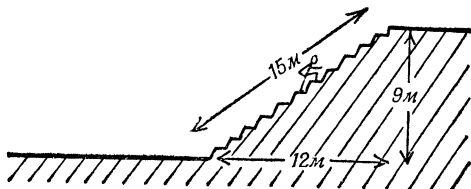
Вы сами можете вычислить свою «полезную» мощность, замечая время подъема по лестнице. Получится довольно высокая оценка, но это порыв, который нельзя поддерживать длительное время. Можно также оценить свою полезную мощность при постоянной работе, решив, с какой скоростью вы сможете влезать по бесконечно длинной лестнице в течение многих часов. Поднимая свой вес, вы запасаете потенциальную энергию, а движение по горизонтали и энергия из-за трения ног о пол порождают теплоту. Это, очевидно, бесполезные растраты, так что горизонтальную часть пути мы не учитываем. Кроме того, нам неизвестны силы, препятствующие горизонтальному движению, и их трудно оценить даже грубо.

Задача 6

Человек весом 70 кг, взбегаая вверх по лестнице высотой 9 м, проходит по горизонтали 12 м и по наклону 15 м.

- 1) *Вычислите полезную мощность превращения энергии питания в потенциальную энергию в кгМ и в л. с.*
- 2) *Если к. п. д. мышц человека составляет 25%, то на тепло растрачивается мощность в 3 раза больше полезной. Какая полная мощность необходима для вертикального движения?*

(В этих расчетах вам следует пользоваться высотой, а не длиной по наклону, так как горизонтальная часть движения не учитывается.)



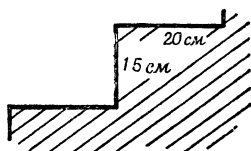
Фиг. 80. К задаче 6.

Задача 7

В задаче 6 человек все же тратит некоторую мощность на горизонтальное движение. Используя изложенные ниже предположения, сделайте очень грубую оценку этих потерь. Когда человек ставит ногу на ступеньку, то он немного притормаживает. Энергия из-за трения ботинок о пол превращается в теплоту и пропадает.

За 10 сек человек, взбираясь вверх на высоту 9 м, проходит по горизонтали 12 м. Предположим, что лестница имеет 60 ступенек (каждая высотой 15 см),

Фиг. 81. К задаче 7.



тогда длина каждого шага будет 20 см. Ботинок не может скользить *все* 20 см, но небольшого скольжения избежать нельзя (если специально не устроить это как-то). Допустим, что при каждом шаге человек проскальзывает примерно на 2—4 см (проверьте это сами). Сила трения, препятствующая скольжению, по-видимому, не может быть больше нескольких килограммов. Предположим, что она составляет 1—2 кг.

- Сколько энергии тратится из-за этого трения на выделение теплоты за 10 сек?
- Какова мощность этих затрат?
- Если само тело выделяет теплоту, в 3 раза превышающую внешние затраты, то какова полная мощность, выделяющаяся при горизонтальном движении?

Задача 8

Подсчитайте собственную мощность при подъеме по лестнице. Ответьте на следующие вопросы, введя правдоподобные предположения или проделав простейшие опыты.

- Какова высота ступеньки?
- На сколько ступенек вы смогли бы подниматься каждую минуту, если бы вам предстояло подниматься много часов?

(Примечание. Вы, по-видимому, переоцените свои возможности, если не проведете грубой проверки или не вспомните о восхождении на гору.)

3) Какова была бы ваша полезная мощность в кГм/сек и л. с. при поднятии с этой скоростью?

Единицы мощности

Приближенное понятие о масштабе некоторых единиц можно получить, представив себе животное, которое способно карабкаться вертикально вверх с единичной мощностью (1 *вт* составляет примерно $\frac{1}{10} \text{ кГм/сек}$, так что нам нужно найти животное весом около $\frac{1}{10} \text{ кг}$, способное взбираться со скоростью 1 *м/сек*. Это могла бы быть небольшая белка, и 1 *вт* можно было бы назвать *беличьей* мощностью, а 1 *квт* — уже *обезьяней*). Мощность небольших электромоторов, используемых в быту, колеблется от $\frac{1}{100}$ до $\frac{1}{2} \text{ л. с.}$ А номинальная мощность промышленных двигателей — от $\frac{1}{2} \text{ л. с.}$ до десятков тысяч лошадиных сил. Номинальная мощность, указанная в паспорте электромотора, показывает, на какую максимальную мощность при соответствующем питании он способен. Электромотор может отдавать и больше, но будет перегреваться.

На некоторых электромоторах мощности указаны в л. с. , а на других — в *квт*. Как же сравнить эти две единицы. Сделаем грубый расчет:

$$1 \text{ л. с.} = 75 \text{ кГм/сек},$$

$$1 \text{ кГ} = 9,8 \text{ ньютон} \approx 10 \text{ ньютон},$$

следовательно,

$$1 \text{ л. с.} = 75 \cdot 9,8 \text{ дж/сек} \approx 750 \text{ дж/сек},$$

т. е.

$$1 \text{ л. с.} \approx 0,75 \text{ квт} = \frac{3}{4} \text{ квт}$$

— очень удобное для инженеров число.

Цель приведенных ниже опытов — дать вам возможность почувствовать, что такое мощность и каковы единицы ее измерения, а также помочь в некоторых случаях установить свою собственную полезную мощность.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ОПЫТЫ

Опыт 1. Измерение собственной мощности — превращение энергии питания в полезную механическую работу.

1) Попробуйте взбежать вверх по лестнице (один пролет) с предельной быстротой.

2) Попробуйте взбежать вверх по очень высокой лестнице (один пролет) с предельной быстротой.

3) Поднимитесь по лестнице (один пролет) со скоростью, которую, по вашему мнению, вы сможете поддерживать в течение нескольких ча-

сов (для достоверности проведите несколько предварительных прикидок).

4) Взянитесь по веревке.

5) В течение нескольких минут крутите колесо с ремненным тормозом. (Подробно об измерениях на колесе с тормозом см. ниже.)

Пусть время засекает ваш партнер, но выполнить эти упражнения должен каждый из вас. Поскольку измерения, естественно, не точны и будут меняться от одного испытания к другому, точная хронометрия ни к чему, вполне подойдут обычные часы с секундной стрелкой. Выразите свою мощность в каждой из приведенных ниже единиц (в большинстве лабораторных опытов перевод результата в другие единицы — простая трата времени на арифметику, но здесь несколько единиц необходимы — свою собственную мощность полезно знать):

а) кГм/сек.

б) лошадиные силы,

в) дж/сек (ватт) ,

г) для заданий 3 и 5 — в *Кал* за 8-часовой рабочий день.

Опыт 2. Измерение полезной мощности бунзеновской горелки при нагревании воды в кружке.

1) Наполните кружку водой и нагревайте ее в течение 1 мин. Сделайте необходимые измерения для вычисления количества тепла, сообщенного воде:

$$\begin{aligned} \text{ТЕПЛОТА} &= \\ &= \text{МАССА ВОДЫ} \cdot \text{ПОВЫШЕНИЕ} \\ &\quad \text{ТЕМПЕРАТУРЫ} \end{aligned}$$

1) Предположите, что справедливо правило:

$$\frac{\text{ПОКАЗАНИЕ ВОЛЬТМЕТРА} \cdot \text{ПОКАЗАНИЕ АМПЕРМЕТРА}}{(\text{в вольтах}) \quad (\text{в амперах})}$$

дает мощность (в ваттах).

Кажется странным, что мощность можно измерить только этими двумя приборами, без всяких часов. Ведь мощность — это скорость и для ее измерения нужны часы. Однако амперметр сам по себе есть измеритель скорости. В известном смысле в нем заключены часы, ибо он измеряет электрический ток в *кулон/сек.*

Если теплоту, затраченную на нагревание металла, вы также считаете полезной, учтите и ее. Для этого умножьте массу на повышение температуры, как и для воды, а затем умножьте произведение на характерный для металла множитель — его удельную теплоемкость. (Удельную теплоемкость алюминия примите равной 0,2, а железа и меди — 0,1.) Выразите полезную мощность в *Кал/мин*, *Кал/сек*, *ваттах*, *л. с.* (приблизительно).

2) (Факультативно.) Повторите опыт с разными «сортиами» пламени: коптящим, желтым, светлым и спокойным, режущим (обычно его считают наиболее горячим). Объясните результаты.

Опыт 3. Если возможно, поверьте или используйте «топливный калориметр» для измерения полной теплоотдачи бунзеновской горелки или полной теплоотдачи при сгорании кусочка угля.

Опыт 4. Измерьте мощность электрокипятильника, а) используя вольтметр и амперметр¹⁾, б) нагревая им воду. (Воспользуйтесь уже собранной схемой из приборов и нагревателя, а позднее соберите ее сами.)

Оба измерения можно проводить одновременно. Показания приборов можно снимать одновременно с нагреванием воды, когда нагреватель, скажем, в течение 2 мин будет находиться в сосуде с водой. Выразите мощности в ваттах и объясните, чем различаются эти две величины.

Опыт 5. Определение полезной мощности и к. п. д. электромотора. Пусть электромотор не выполняет полезной работы, которая затруднит измерения, а просто крутит колесо с тормозным ремнем (см. ниже). Подсчитайте его мощность на выходе в $\kappa\Gamma\text{м/сек}$ и *ваттах*.

Показания амперметра и вольтметра (пока воспользуйтесь собранной схемой) дадут нам величину полной мощности, поступающей из сети.

Найдите ее. Подсчитайте к. п. д. мотора.

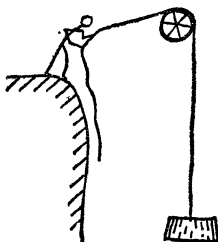
(Примечание. Если вы хорошенько подумаете, то поймете, что к. п. д. мотора не может быть величиной постоянной, характерной для мотора при любой нагрузке. Каков, по-вашему, к. п. д. при холостом ходе, без нагрузки?)

А что вы получите, если мотор так нагрузить, что он вообще не сможет вращаться?)

Применение тормозного ремня для измерения мощности

Чтобы измерить мощность человека, мы можем заставить его вытягивать груз с помощью длинной веревки (фиг. 82) или использовать систему блоков и большой груз, но все это сложно. Удобнее устройство, заменяющее висящий

Фиг. 82.

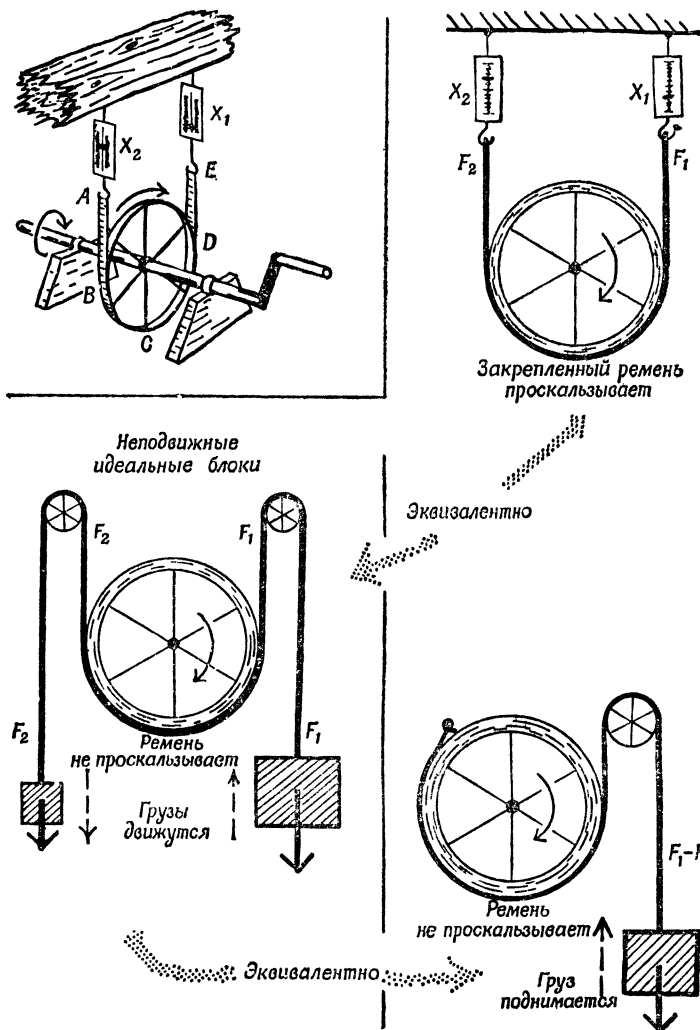


груз трением тормозного ремня о колесо или барабан. Одно из таких устройств показано на фиг. 83. В других используется велосипедная рама, а человек крутит педалями заторможенные колеса.

Ременный или веревочный пояс $ABCDE$ оттягивается вверх пружинными весами X_1 и X_2 , так что он туго прижимается к нижней половине окружности обода колеса. Человек крутит колесо за рукоятку. Пружинные балансы препятствуют движению ремня вместе с колесом, и он трется о колесо по полуокружности BCD , мешая движению. Участок DE , натяжение которого измеряется весами X_1 , сильно тянет в сторону, противоположную движению колеса. На участке AB натяжение, измеряемое весами X_2 , способствует движению. Если эти натяжения равны F_1 и F_2 , то результирующая сила будет равна их разности $F_1 - F_2$.

Когда колесо совершает один оборот, длина его окружности $2\pi R$ целиком проходит под ремнем, преодолевая силу трения $(F_1 - F_2)$. Для человека, крутящего колесо, ситуация будет такой, как если бы пояс, оттягиваемый грузами F_1 и F_2 , двигался вместе с колесом. А это было бы эквивалентно намотыванию на колесо веревки с грузом $(F_1 - F_2)$, который заставляет человека затрачивать при каждом обороте энергию $2\pi R(F_1 - F_2)$. Вернемся теперь к реальному устройству с пружинными весами, показывающими силы F_1 и F_2 . При каждом обороте человек должен затрачивать энергию, равную

(ДЛИНА ОКРУЖНОСТИ $2\pi R$) $\cdot$ (РАЗНОСТЬ НАТЯЖЕНИЙ $F_1 - F_2$).



Фиг. 83. Тормозной пояс для измерения мощности.

Когда при вращении колесо трется о ремень (тормоз), переход энергии (из сообщаемой колесу механической формы в теплоту тормоза) определяется выражением

$$\text{Работа} = (\text{Сила}) \cdot (\text{Расстояние}),$$

а при одном обороте:

$$\text{Работа} = (\text{Длина окружности}) \cdot (\text{Разность натяжений}).$$

Система с закрепленными пружинными весами эквивалентна системе с фиксированными грузами, перекинутыми через блоки, а это эквивалентно подниманию колесом груза $(F_1 - F_2)$.

Используя этот результат с учетом числа оборотов колеса и показаний весов за определенный промежуток времени, мы можем вычислить мощность, превращаемую при торможении в теплоту. Хотя тормоз превращает эту мощность в бесполезное тепло, она могла бы быть полезной, если бы ремень был прикреплен к колесу и поднимал груз. Таким образом в подобной схеме измеряется «полезная» мощность.

Задача 9

Перепишите и дополните следующие утверждения:

(П р и м е р. 1 узел — это единица скорости. Она равна 1 морской миле в 1 час.)

а) 1 джоуль — это единица _____. Он равен 1 _____.

б) 1 ватт — это единица _____. Он равен 1 _____.

в) 1 киловатт — это единица _____. Он равен 1 _____.
(напишите числа и единицы, выраженные в секундах, метрах, ньютонах, джоулях и т. д.).

г) 1 вт·сек означает 1 вт $\times$ 1 сек, следовательно, это то же, что и 1 _____? Поэтому 1 вт·сек есть единица _____.

д) 1 квт·час есть единица _____.
Он равен _____ (напишите числа и единицы, выраженные в секундах, метрах, ньютонах, джоулях и т. д.).

Задача 10

Обычная цена электроэнергии составляет 4 коп. за киловатт-час. Если бы дневной рацион 3300 Кал можно было принять в виде электричества, то во сколько бы вам обошелся день? _____

Задача 11. Диета и энергия

Сейчас в некоторых частях света средний рацион составляет меньше 2000 Кал в день, а в других 3300 Кал. Эти числа найдены из полной энергии, полученной при переваривании пищи. Других источников снабжения энергии для поддержания работы тела нет, за исключением материалов самого тела: жира и т. д.

Для исследования вопроса о голодном рационе сделайте следующие вычисления. (Считайте, что 1 Кал = 1 ккал = 4200 Дж.)

а) Единицы: перевод рациона в другие единицы

Превратите 2000 Кал в день в другие единицы. (Заметьте, что это мощность.)

(У к а з а н и е. На вопросы, отмеченные звездочкой, дайте приближенный ответ.)

2000 Кал/день = _____ Кал/сек (не делайте сокращений, оставьте результат в виде сомножителей) = _____ Дж/сек (не сокращайте) = (приблизительно) _____ Дж/сек, или вт.

Здоровый человек может растратить эти 2000 Кал/день в виде тепла своего тела, так что трудно установить, сколько дополнительной энергии из этих 2000 Кал можно истратить на полезную механическую работу. Однако, чтобы выяснить положение человека, живущего на таком рационе, сделайте требуемые ниже вычисления.

б) Минимальный рацион

Спящий человек затрачивает в среднем на поддержание жизни (работы сердца, легких и т. д.) и согревание около 75 вт, тогда как уже при простом спокойном сидении ему нужно 120 вт. Какое снабжение пищей необходимо для такого человека, если он 8 часов в сутки спит, а остальные 16 часов спокойно сидит? * _____ Кал/день.

в) Голодный рацион

Допустим, что рацион человека составляет 2000 Кал/день, причем $\frac{3}{4}$ этого рациона уходит на поддержание жизнедеятельности организма, а остающаяся $\frac{1}{4}$, 500 Кал, может быть затрачена на другую деятельность. (Сомнительно, чтобы этих $\frac{3}{4}$ было достаточно. По-видимому, человек будет растрачивать свой жировой запас, а затем даже что-то менее безопасное.)

1) Сколько часов в день сможет он медленно брести по дороге, если эта дополнительная деятельность требует еще 100 вт?
_____ часов в день.

2) По сколько часов в день он может затрачивать мощность $\frac{1}{8}$ л. с. для полезной работы? Считайте, что $\frac{1}{8}$ л. с. ≈ 100 вт и что 300 вт уходит на тепловые потери во время этой полезной работы. *
_____ часов в день.

г) Хороший рацион

Допустим, что ваш рацион составляет 3300 Кал/день; 2000 Кал вы используете на обычную жизнь (еду, сон, прогулки и т. д.). Допустим, что остальные 1300 Кал используются для такой деятельности, как рытье канав или поднятие грузов.

1) Предположим, что ваша деятельность требует полезной мощности 200 вт ($\approx \frac{1}{4}$ л. с.) и сопровождается тепловыми потерями 600 вт. Сколько часов в день вы сможете работать, тратя 1300 Кал? * _____ часов.

2) Крутя заторможенное колесо в лаборатории, найдите собственную полезную мощность. Допустим, что ваш к. п. д. равен 25%, так что на дополнительное растрчиваемое тепло уходит в 3 раза больше, чем на полезную работу. Сколько часов в день такой работы обеспечивают вам 1300 Кал (с учетом затрат)? * _____ часов.

3) Если бы все 1300 Кал вы могли затратить на подъем по лестнице, превратив их в потенциальную энергию без тепловых затрат, то сколько 5-метровых лестничных пролетов могли бы вы преодолеть за день? (Для этой оценки воспользуйтесь своим собственным весом.) * _____ пролетов.

4) Предположим, что ваш к. п. д. составляет 25%. Сколько таких же пролетов вы сможете преодолеть, получая 1300 Кал в день? *
_____ пролетов.

ГЛАВА 29 • ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВАНИЯ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

«В соответствии с общепринятыми правилами ревизии нами проверен балансовый отчет ... , включая как проверку бухгалтерских записей, так и другие документы, о которых упоминалось выше По нашему мнению ...»

Из акта ревизии

Рассмотрение расхода топлива и механическое правило

РАБОТА=СИЛА · РАССТОЯНИЕ

привели нас к определенному понятию—*энергии*, изменение которой измеряется *работой*. Было установлено также, что энергия всегда сохраняется. Мы констатировали этот принцип или, скорее, просто приняли его, приведя ряд простых примеров. Все это было сделано для того, чтобы вы поняли, что такое энергия, прежде чем мы начнем говорить об ее удивительной истории.

Экспериментаторам прошлого нелегко было выпутаться из множества форм энергии и составить этакий «балансовый отчет». Вскоре после того, как Ньютон показал важность величины mv для механики, были высказаны предложения, что измерять эффект силы лучше величиной mv^2 . Ей было дано энергичное имя *vis viva* — «живая сила», тогда как mv было названо просто импульсом. Тогда, в XVII веке, были даже две соперничающие школы: одни яростно защищали mv , а другие — mv^2 . Однако позднее стало всем ясно, что полезны обе величины: прирост mv — это (*сила*) · (*ВРЕМЯ*), а прирост mv^2 — удвоенная (*сила*) · (*РАССТОЯНИЕ*).

Машины

Произведение *сила* на *расстояние* уже давно играло важную роль в примитивных механизмах прошлого. Бессознательно им пользовались еще создатели первых машин, а Леонардо да Винчи (~1500 г.) уже ясно писал о нем. При расчетах колес, блоков, прессов и т. д. эти произведения «по обе стороны» устройства принимались равными, за вычетом некоторых затрат на трение. Если мы *разность затраченной и полученной работы* назовем *изменением*

энергии, то идеальные механизмы (без трения) сохраняют ее. Гарантией служит эксперимент — либо непосредственное измерение на механизмах (с учетом потерь из-за трения), либо косвенное заключение из опытных правил для рычагов, гидравлических прессов и т. д.

Экспериментальное основание обязательно должно существовать. Кабинетный ученый не может гарантировать, что для равновесия детских качелей-весов $F_1 \cdot (\text{плечо}_1)$ будет равно $F_2 \cdot (\text{плечо}_2)$ (откуда можно заключить, что работы по обе стороны равны). Даже если он объявит, что его рассуждения делают это заключение весьма правдоподобным, в этом обязательно будет отголосок «лабораторных работ», выполненных им когда-то в юности ¹⁾.

Вечные двигатели

Комбинирование простых механизмов в сложную схему не дает надежды получить энергии больше, чем затрачено. Неудачи с вечными двигателями привели к убеждению о сохранении энергии в ограниченном механическом смысле. В своем труде «Маятниковые часы» (1673 г.) Гюйгенс, современник Ньютона, предупреждал:

«Когда любое количество грузов силой их притяжения в движение приведено, то общий центр тяжести, по-видимому, не может подняться выше того места, кое он занимал до начала движения... Когда бы строители новых машин, пустые попытки построить вечный двигатель предпринимающие, с этим принципом познакомились, они бы лучше свои ошибки видели и совершенную невозможность сделать оный механическим способом поняли бы».

Потенциальная энергия + кинетическая энергия

Закон рычага применим к уравновешенным качелям-весам как в покое, так и в движении. Когда на одном конце мальчик-толстяк с постоянной скоростью опускается вниз, на другом худенький мальчик взлетает вверх; действует закон рычага и, следовательно,

РАБОТА НА ВХОДЕ = РАБОТА НА ВЫХОДЕ.

¹⁾ Архимед считал, что он может получить правила рычагов из чистых рассуждений, на основе простых и очевидных аксиом. Но, будучи хорошим экспериментатором, он, несмотря на все теоретическое могущество, по-видимому, тщательно проверял свои правила. Как говорят, он с успехом использовал реальные рычаги и катапульты при защите Александрии.

Нетрудно нарушить этот закон. Подвиньте толстяка поближе к краю, тогда качели будут ускоряться и худенький мальчик взлетит вверх, а толстяк стукнется о землю. Если рассматривать вес мальчиков как силу на входе и на выходе, равенство (*работа на входе*) = (*работа на выходе*) уже не будет соблюдено — толстяк внесит больше, чем забирает худенький мальчик. Но нам нет нужды отказываться от закона сохранения энергии. Можно придумать другую форму, кинетическую энергию, $E_{\text{кин}}$, и вычислять ее по правилу $E_{\text{кин}} = \frac{1}{2}mv^2$, полученному из комбинирования $F=ma$ и определения (*работа*) = $F \cdot s$. В начале XIX века сохранение энергии означало, что сумма

$$\begin{array}{ll} \text{ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ} + \text{КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ} \\ \text{изменение которой равно} & \text{величина которой равна} \\ (сила) \cdot (расстояние) & \frac{1}{2}mv^2 \end{array}$$

постоянна (для идеальных механических систем). Этот закон полезен для решения задач физики и техники. На деле он состоит из II и III законов Ньютона и предположения, что силы складываются как векторы. Поэтому он основан на эксперименте в той же степени, что и II закон: $F=ma$. Это выявляет важную характеристику таких механических систем, о которой было известно уже в давние времена: изменение энергии при любых движениях не зависит от выбранного пути. Пусть, например, груз от двери сарая *A* переносится в дальний угол его чердака *B*. Как бы мы ни перемещали его:

сначала подняли вверх, а потом переместили по горизонтали,
сначала по горизонтали, а потом вверх,
или вверх по наклонной плоскости,
или по какой-то причудливой кривой (с помощью блоков),
или даже сначала подняли над крышей, а затем опустили на чердак,

прирост потенциальной энергии ($E_{\text{пот}}$) будет тем же самым.

Чтобы показать, как это следует из закона сохранения энергии, рассмотрим перемещение из *A* в *B* по двум путям, причем будем начинать и кончать состоянием покоя, трением пренебрежем. Перенесем груз из *A* в *B* по пути *I*, а затем назад по пути *II*. Возвратившись в начальную точку *A*, мы пришли к той же потенциальной энергии. Следовательно, затраты на путях *I* и *II* одинаковы. В противном случае мы могли бы создать вечный двигатель, перемещая груз вверх по одному пути, а вниз — по другому и получая при каждом цикле прирост энергии.

Поверив в сохранение энергии, мы видим, что правило Галилея о наклонной плоскости очевидно; каков бы ни был наклон, масса M , сталкиваемая с высоты h , теряет потенциальную энергию, равную Mgh , и приобретает кинетическую энергию, равную $\frac{1}{2} Mv^2$. Если нет потерь на трение, то эти два изменения должны быть сбалансированы, $Mgh = \frac{1}{2} Mv^2$. Тогда скорость $v = \sqrt{2gh}$ — одна и та же при любом наклоне высотой h , как отвесном, так и отлогом, как прямом, так и искривленном. Так что *опыт Галилея был фундаментальной проверкой закона сохранения энергии*.

Если математикам «дать» Солнце и планету при некотором начальном условии, то они смогут предсказать орбиту планеты. Один из наиболее простых способов — это написать уравнение, исходя из того, что сумма (кинетическая энергия) + (потенциальная энергия) (в изменяющемся гравитационном поле Солнца) вдоль орбиты остается постоянной. В комбинации с уравнением для другой сохраняющейся величины (например, момента количества движения) это приведет к уравнению для орбиты, т. е. к эллипсу ¹⁾. Хотя закон сохранения энергии полезен, до сих пор он вряд ли был всеобщим. Включение же теплоты, химической энергии и др. в одну грандиозную схему привело к перерастанию его в важнейший закон.

Теплота как форма энергии

Лукреций (~80 г. до н. э.) так описывал взгляды греческих философов, живших за несколько веков до него ²⁾:

«... телам изначальным, конечно,
Вовсе покоя нигде не дано в пустоте необъятной.
Наоборот: непрерывно гонимые разным движеньем,
Частью далёко они отлетают, столкнувшись друг с другом,
Частью ж расходятся врозь на короткие лишь расстоянья.
Тех, у которых тесней их взаимная сплоченность, мало,
И на ничтожные лишь расстоянья прядая порознь,
Сложностью самых фигур своих спутанны будучи цепко,
Мощные корни камней и тела образуют железа
Стойкого, так же, как всё остальное подобного рода.
Прочие в малом числе, в пустоте необъятной витая,
Прядают прочь далеко и далёко назад отбегают
На промежуток большой. Из них составляется редкий
Воздух...»

¹⁾ Если дано Солнце и две планеты, скажем Солнце, Земля, Луна, всё становится намного труднее, ибо необходимо решить задачу о возмущении. И все же для решения знаменитой задачи «трех тел» первое, с чего следует начать, это с утверждения о сохранении энергии.

²⁾ Лукреций, О природе вещей, Изд-во АН СССР, 1946, стр. 79.

Воззрения греческих атомистов в течение многих веков либо предавались забвению, либо преследовались. Их идеи были возрождены только во времена Галилея. Причудливую теорию атомов строил Декарт, а Ньютон размышлял над теплотой как движением атомов. Философы последующего века создали грандиозные схемы применения могучей механики Ньютона к декартовым атомам. Они считали, что, задав положение и движение всех атомов, можно предсказать все, что произойдет в будущем. Но атомная картина все еще оставалась в рамках заумных рассуждений, а связь между теплотой и «атомным» движением была лишь внешней.

«Теплород»

В течение долгого времени после Ньютона представление о теплоте продолжало оставаться не слишком ясным. Примерно в 1750 г. Джозеф Блейк провел четкую грань между *количеством тепла* и *температурой*. Он измерял количество тепла, нагревая воду или растапливая лед. В последнем случае не требуется даже термометра — теплота измеряется по массе растаявшего льда. Он определил величину, которую мы теперь называем «удельной теплоемкостью», и построил теорию теплоты как некой жидкости, которая без потерь может перетекать из горячих тел в холодные. Даже когда кажется, что теплота исчезает при плавлении или испарении, она прячется в виде «скрытой теплоты», которая может быть выделена при обратном переходе.

Эта «жидкость» вскоре была названа флогистоном, или «теплородом». Нагревание тел означало наполнение пространства между атомами теплородом и увеличение его давления. Считалось, что между «атомами» воды, обладающей большой теплоемкостью, имеется много свободного места. А в свинце с его малой теплоемкостью места для теплорода должно быть мало, небольшого количества его хватает, чтобы наполнить промежутки до высокой температуры. Было много споров о весе теплорода. Некоторые считали, что он обладает весом, другие же, убедившись в том, что нагретые тела легче, приписывали ему отрицательный вес. Наконец, Румфорд взвесил некое количество льда, нагрел его, пока не превратил в теплую воду, вновь взвесил и перемен не обнаружил. Однако это не опровергало существования теплорода, а лишь указывало на интересное его свойство — невесомость. К 1800 г. теория теплорода казалась хорошо экспериментально обоснованной. Она позволяла легко разбираться в нагревании, охлаждении, плавлении, испарении. Она объясняла даже расширение при

нагревании: теплород раздвигал атомы, действуя на них силовыми полями, подобными тем, которые сейчас так популярны в атомной физике. Она с легкостью объясняла также нагревание вещества при трении. Соскальзывая вниз по канату, матрос выжимает из него теплород — говорили приверженцы теплорода. Они могли почти нарисовать картину, как руки человека выжимают теплоту из промежутков между атомами каната, подобно воде из мокрой губки. Но почему же теплород не возвращался обратно, когда матрос отпускал канат? «Да, не возвращается» — таков, по-видимому, был первый ответ. Разумеется, он не возвращается, ибо натертые предметы остаются горячими довольно долго и медленно передают тепло своему окружению. Суть дела в том, — следовали подробные объяснения, — что трение сдавливает канат, уменьшая в нем пространство для теплорода. Таким образом, теплород выжимается и обжигает человеку руки. Это изменение необратимо — в канате остается меньше места для теплорода.

Меньше места для теплорода? Но при этом сдавленный канат должен иметь и меньшую удельную теплоемкость. Это могло бы послужить решающей проверкой теплородной точки зрения. Эксперименты не обнаружили каких-либо изменений, хотя многие приверженцы теплорода цеплялись за свою точку зрения. Они, по-видимому, оправдывались тем, что выжимается лишь малая доля всего теплорода, поэтому изменения удельной теплоемкости должны быть очень малыми. В то время как Блейк и другие уточняли и улучшали измерения, все с большей настойчивостью выдвигалось другое объяснение теплоты — как энергии молекулярного движения.

«Теплота — это очень быстрое колебание неощутимых частичек предмета... то, что мы ощущаем как теплоту, для предмета не более как движение».

Джон Локк (1796 г.)

«... теплота — это *vis viva*, происходящая из-за неощутимого движения молекул тела».

Лавуазье и Лаплас (1780 г.)¹⁾

Все более широкое применение паровых машин и новое понимание химии горения в XIX веке вызвали всеобщий интерес инженеров и натурфилософов (химиков и физиков) к природе тепла.

¹⁾ Цитируется Ллойдом Тэйлором в книге «Physics, The Pioneer Science».

Лавуазье и Лаплас полагали, что животное и человек также «сжигают» свою пищу в кислороде с образованием воды и углекислого газа, получая столько же тепла, как если бы ту же пищу сжигали в маленькой печи и нагревали воду. Они утверждали, что измерение вдыхаемого кислорода или выдыхаемого углекислого газа могло бы показать, сколько мы «сжигаем» пищи. Они предложили идею химической энергии, которая высвобождается при горении. В 1779 г. Кроуфорд для определения потребления кислорода сажал в изолированный ящик морскую свинку и измерял ее теплоотдачу. Затем он заменил свинку небольшой печкой с горящим углем. При том же потреблении кислорода печка давала почти то же количество тепла. Аналогичный результат дал и горящий воск. Полученные результаты были обнадеживающими. Такие эксперименты поистине весьма трудны, но с той поры они систематически проводились на животных и человеке, и точность их все возрастала. Результаты показали, что выделяемая животными теплота согласуется с теплотой, полученной при сжигании, с точностью до 1%.

Доказательство Румфорда

В конце XVIII века граф Румфорд впервые экспериментально доказал, что теплота — вовсе не неуничтожимая жидкость, а нечто, получаемое при желании в неограниченном количестве за счет механической энергии. Сам Румфорд (его настоящее имя Бенджамен Томсон) был замечательным человеком. Уроженец Новой Англии, Румфорд легкомысленно стал противником тех, кто победил в борьбе за независимость, и поэтому вынужден был эмигрировать в Англию. Он был известен не только как блестящий организатор и ученый-экспериментатор, обладающий способностями и огромной любознательностью, но и как политик, покрывший себя славой. Получив за выдающиеся заслуги рыцарское звание, Румфорд отправился в путешествие по Европе. В период своего пребывания в Баварии он так блестяще проявил свои организаторские способности, что был назначен на пост военного министра и ему поручено было реорганизовать армию. Успешно выполнив это, он, опираясь на армию, сумел организовать огромную массу безработных, наводнявших в ту пору Мюнхен, построил для них удобные бараки и обеспечил работой. Благодарное баварское правительство пожаловало ему графский титул; он выбрал себе имя Румфорд в честь небольшого местечка вблизи Конкорда в Нью-Хэмпшире. Дальнейшую славу ему принес разработан-

ный им дешевый, но здоровый пищевой рацион и специальное кухонное оборудование; Румфорд провел столько исследований по экономичным печам и очагам, что после своего возвращения в Англию давал консультации по этим вопросам в разных уголках страны. Еще будучи в Баварии, Румфорд исследовал теплоту, выделяемую при сверлении стволов бронзовых пушек. Он заметил, что тупое сверло очень плохо режет металл, но дает огромное количество тепла. Пока лошади приводили в движение очень тупое сверло, Румфорд успевал вскипятить поставленные на пушках котлы с водой. Он пришел к выводу, что выделение тепла безгранично и зависит лишь от продолжительности работы лошадей. Так Румфорд пришел к идее тепла как формы энергии ¹⁾. Он нанес жестокое поражение сторонникам теплорода своими измерениями теплоемкости стружек. Он установил, что стружки имели *ту же* удельную теплоемкость, что и остальная часть пушки, т. е. в них было столько же свободного места для «теплорода».

1840—1860 годы. Доказательство

В 1840 г. теория теплорода подверглась ожесточенным нападениям, хотя ее еще придерживались ученые ²⁾.

Наступило время, когда появилось новое убеждение, что теплоту можно создать за счет механической энергии. Однако идея эта формулировалась пока неясно, слово «энергия» было непривычным, бытовало еще запутывающее все слово «сила». Чтобы теплота

¹⁾ Сохранились записи некоторых измерений Румфорда: выделившейся теплоты за $2\frac{1}{2}$ часа сверления было достаточно для нагревания 12 кг воды от точки замерзания до кипения. Румфорд установил, что для вращения сверла достаточно одной лошади. Если из этих записей мы хотим определить энергию, соответствующую 1 Кал, то нужно сделать какое-то предположение о лошади. Воспользуемся оценками Уатта: 1 лошадь дает 75 кгм/сек , а за 2,5 часа — $75 \cdot 2,5 \cdot 60 \cdot 60\text{ кгм} = 700\,000\text{ кгм} = 7\,000\,000\text{ Дж}$. Выделенное тепло нагревает 12 кг воды на 100°C , или составляет 1200 Кал , т. е. 1 Кал соответствует $(7\,000\,000/1200)\text{ Дж} = 5500\text{ Дж}$.

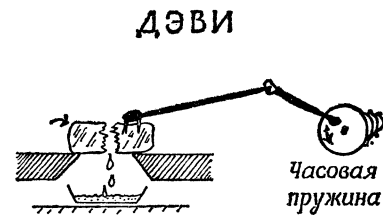
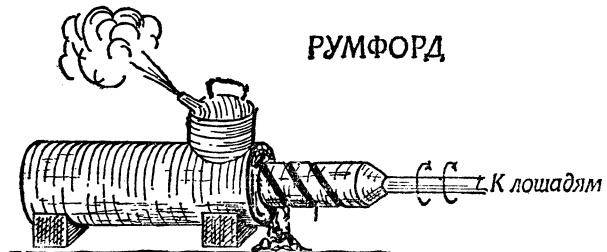
²⁾ Невидимые жидкости всегда были модны в науке: теплород, электричество, эфир. Если вы отбрасываете идею таинственной жидкости как архаизм или шаманство, вспомните, что ей ведь приписывались только те свойства, которые соответствуют наблюдениям над природой и с которыми должен согласиться любой скептик. Считалось, что эти жидкости должны сохраняться так же, как сохраняются энергия и импульс. Ошибка поклонников теплорода заключалась в том, что они называли его «жидкостью» и приписывали этой жидкости свойства, которые явно не сохраняются; они «ставили не на ту лошадь», дав ей к тому же неудачное имя. Бенджамин Франклин и другие ученые прошлого «ставили» на сохранение другой жидкости, электрического заряда — одного из вероятнейших победителей в истории физики.

утвердилась как форма энергии, нужны были точные и разнообразные эксперименты. И с начала 1840 г. они появились во множестве.

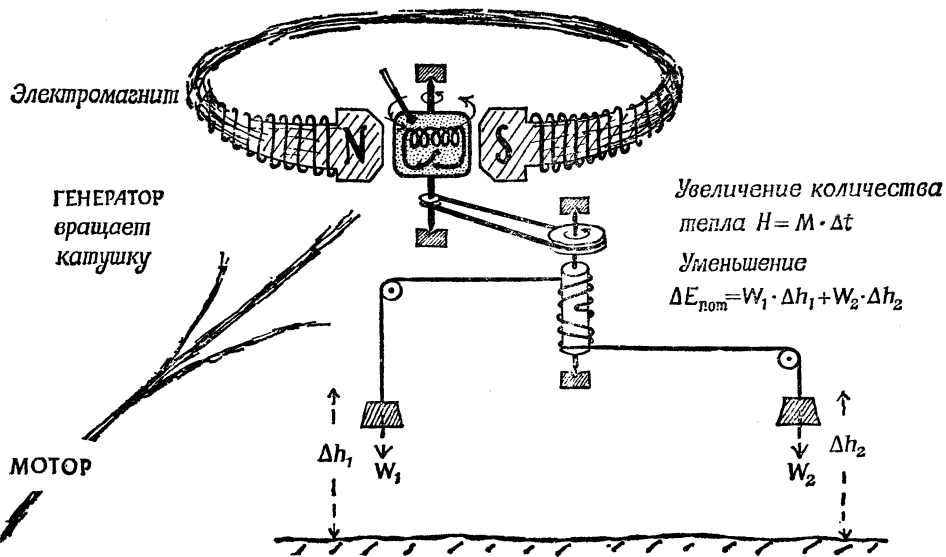
Чтобы поверить в сохранение энергии, выполните эти эксперименты. Для победы в науке нужны сильные доказательства. Если теплота — *действительно* форма энергии, эквивалентная потенциальной и кинетической энергиям, то в каждом эксперименте, в котором происходит превращение одной формы энергии в другую, т. е. обмен «теплота→механическая энергия», должен действовать один и тот же «обменный курс». Эксперименты, в которых за счет механической энергии создавалась теплота, следовали один за другим. Убыль механической энергии измерялась по формуле (*сила*)·(*расстояние*), а увеличение количества тепла — произведением (*масса нагреваемой воды*)·(*повышение температуры*). Каждый раз природе задавался вопрос: «Дает ли каждая единица потенциальной энергии одно и то же количество тепла?» или «Зависит ли от материала и метода эксперимента величина (*ньютон*)·(*метр*)=(*потенциальная энергия*), которая должна исчезать для появления *Кал*?». Если при любых переходах в теплоту — будь то химическая энергия или электрическая — «обменный курс» один и тот же, то мы можем говорить о всеобщем законе сохранения.

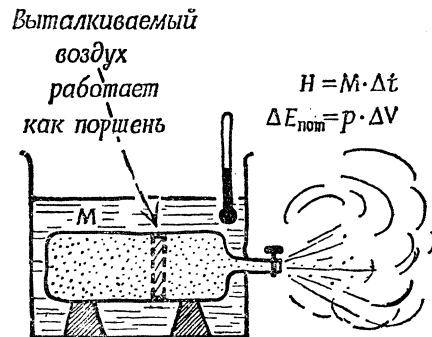
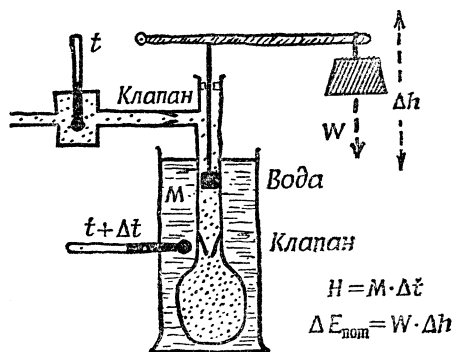
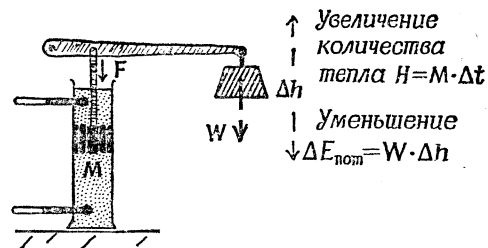
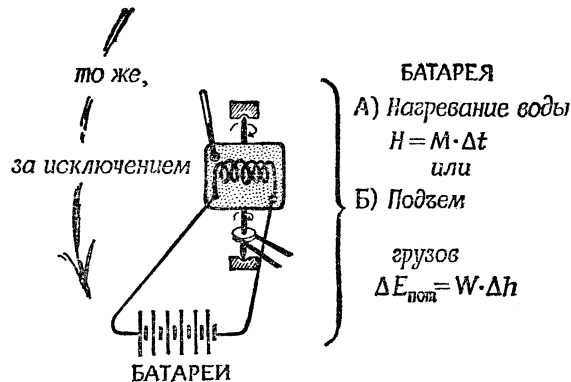
Многие из таких экспериментов были поставлены Дж. П. Джоулем — манчестерским пивоваром, ученым-любителем, который целью своей жизни поставил доказать, что теплота — это форма энергии. С огромным энтузиазмом и неподражаемым искусством Джоуль давал одно экспериментальное доказательство за другим. Его аргументы убеждали как разнообразием, так и точностью измерений.

Точное измерение количества тепла весьма затруднительно. Тепло утекает из любого прибора, температура которого отличается от комнатной. Эту утечку можно уменьшить, если использовать невысокие температуры, ибо скорость утечки приблизительно пропорциональна разности между комнатной температурой и температурой прибора. Утечку можно сделать менее существенной, применяя прибор больших размеров, так как утечка тепла — это *поверхностный эффект*, а полный запас тепла при данном повышении температуры пропорционален объему. Поэтому в большом приборе утечка будет составлять меньшую долю измеряемого количества тепла. Джоуль брал много килограммов воды и специальный термометр, градуированный с точностью до $\frac{1}{20}$ градуса, так что он мог установить температуру с точностью до $\frac{1}{200}$ градуса.



ДЖОУЛЬ





Фиг. 84. Опыты Румфорда, Дэви и Джоуля с превращением энергии.

Он прилагал большие усилия, чтобы уменьшить потери тепла и контролировать их. В некоторых случаях он пытался исключить утечку тепла, вычитая результаты двух экспериментов при «работе» и «холостом» ходе, в которых переход энергии был разным, а потери одни и те же.

В одном из своих ранних экспериментов Джоуль нагревал воду, заставляя ее протекать по очень тонким трубкам. Перфорированный поршень в цилиндре с водой приводился в движение весом падающих грузов. При этом (*вес*) · (Δ *высоты*) давали ему убыль потенциальной энергии (скажем, в кГм), а (*масса воды*) · (*возрастание температуры*) измеряли создаваемое количество тепла.

Джоуль нашел, что на каждую единицу теплоты (1 фунт воды на 1 градус Фаренгейта) затрачивается потенциальной энергии 770 *фут·фунт* веса ¹⁾.

Джоуль усовершенствовал метод. Для этого вода размешивалась. Делалось это с помощью специального колеса с лопатками, помещенного в изолированный контейнер с водой и приводимого в движение падающими грузами. Благодаря специальному устройству контейнера и лопаток трение сильно возрастало и для приведения лопаток в движение требовался значительный вес. Когда грузы падали до конца, Джоуль отцеплял их и поднимал вновь. Для нагревания воды потребовалось 20 таких циклов (см. задачу 2 в конце этой главы). Медленно снижаясь, при каждом падении грузы теряли потенциальную энергию, но заканчивали падение с небольшой кинетической энергией, которая передавалась при ударе полу. Джоуль тщательно учитывал эту кинетическую энергию, которая возникала за счет потери потенциальной энергии, но не давала вклада в измеряемое количество тепла. Он тщательно измерял охлаждение сосуда, так что мог учесть утечку тепла и во время перемешивания воды. Затем брал полную потерю потенциальной энергии и полное теплотыделение и получал коэффициент перехода 780 : 1 в своих единицах. Такое отношение характерно не только для воды. Чтобы доказать это, Джоуль помещал в сосуд и ртуть, и китовый жир и даже определял выделение тепла при трении железных плиток ²⁾.

¹⁾ Сейчас мы измеряем количество тепла в *кж воды на градус Цельсия*, или *Калориях*, а потенциальную энергию — в абсолютных единицах (*ньютон*) · (*метр*), названных позднее в честь ученого — *джоуль*.

²⁾ Он учитывал даже звуковую энергию скрежета железных плиток. Для этого он нанял виолончелиста, который должен был состояться в громкости со скрежетом плиток, а потом измерялась энергия, затрачиваемая смычком виолончели. В результате Джоуль получил 1%-ную поправку.

Позднее Джоуль вернулся к еще более точному измерению перемешивания воды. Его последний опыт с перемешиванием, сделанный через 40 лет после первого, был повторен Роуландом в университете Джона Гопкинса, однако крыльчатое колесо приводилось в движение паровой машиной.

В первых экспериментах Джоуль сделал очень смелый шаг — он пользовался только что открытым электрическим током. Джоуль, а также Генри в Принстоне и другие построили большие электромагниты.

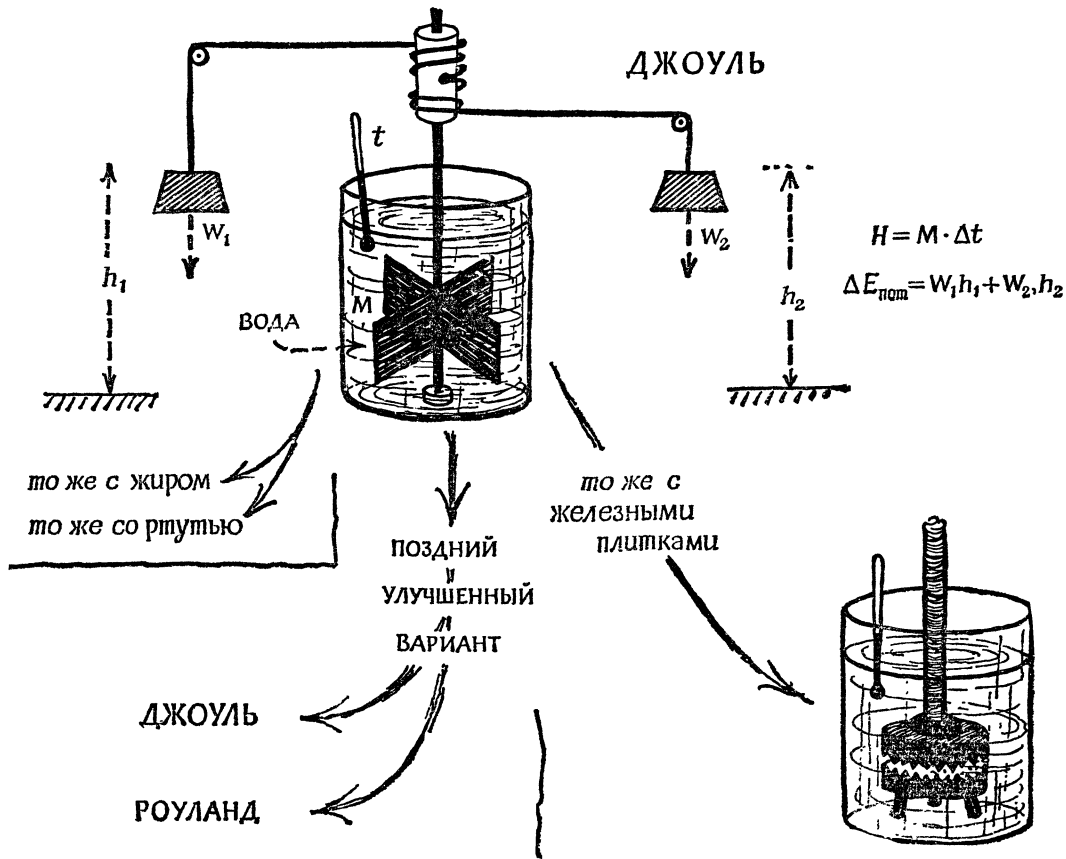
Джоуль создал одну из первых электромагнитных машин, которую можно было использовать и как электромотор, и как генератор. Он брал катушку из медного провода, которая вращалась в поле между полюсами «электромагнита». Генератор приводился в движение падающими грузами. В отсутствие тока катушка вращалась легко, и для преодоления трения нужны были лишь небольшие грузики. Когда же катушка вырабатывала ток, приводить ее в движение становилось гораздо труднее — требовались значительно большие грузы.

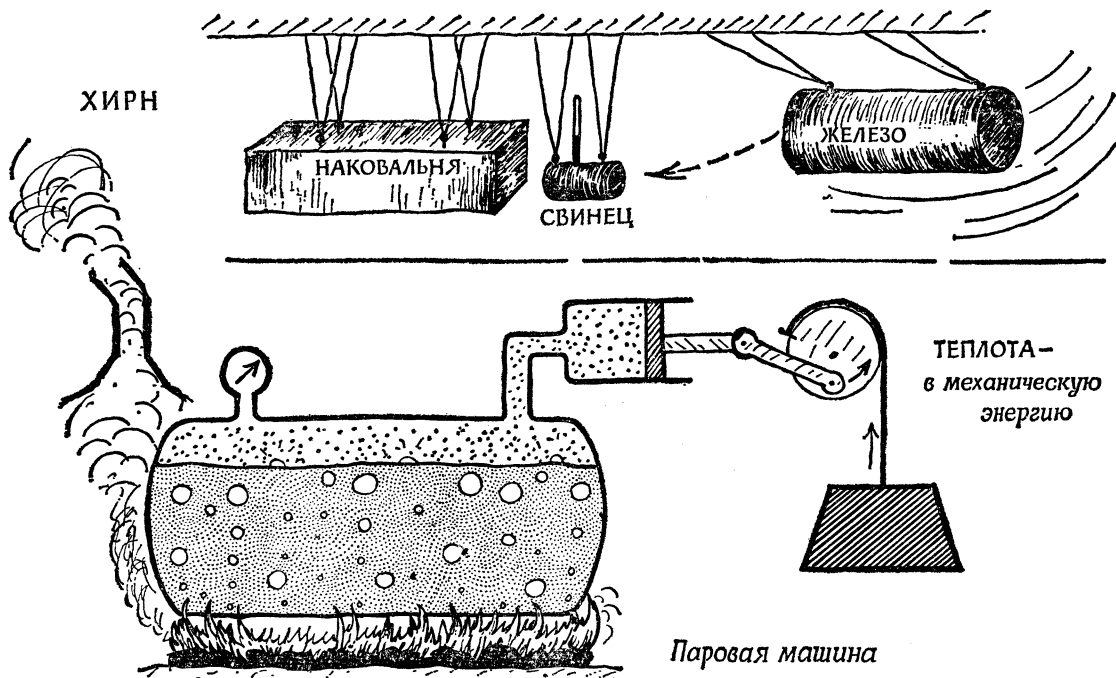
Джоуль догадался, что дополнительная потенциальная энергия выделялась током в виде теплоты. Чтобы получить максимальный ток, он соединил концы катушки в короткозамкнутую цепь и, окружив катушку водой, собрал выделяемое тепло.

Вычитая результаты измерений при холостом ходе из результатов рабочих измерений, Джоуль исключал трение, учесть которое по-другому было бы невозможно. Итак, электрическая энергия в качестве промежуточного звена дала практически то же самое отношение, т. е. $780 : 1$.

Затем Джоуль использовал свою машину как электромотор, работающий от батареи. Когда катушка была зажата (в покое), текущий через нее ток нагревал окружающую воду. Когда же катушка освобождалась и, вращаясь, поднимала груз, теплоты выделялось меньше, но груз приобретал потенциальную энергию.

Вычитание двух результатов для одинаковых химических изменений в батарее при переходе потенциальной энергии в теплоту снова дало отношение примерно $800 : 1$. На этот раз общим источником была химическая энергия и Джоуль предположил, что при одном и том же расходе химикалий выделяется одна и та же энергия. (Из других химических опытов он убедился, что химическая, электрическая и тепловая энергии при взаимных переходах правильно «балансируют его счета».)





Фиг. 85. Опыты Джоуля, Роуленда и Хирна с превращением энергии.

Эксперименты по изучению взаимного превращения механической энергии и теплоты

Краткое описание и результаты некоторых из наиболее известных экспериментов

Год	Экспериментатор	Метод	Результат в единицах <i>Kcal</i> на тыс. <i>дж.</i>
1708	Румфорд	Сверление пушки тупым сверлом. Лошади, приводившие в движение сверлильный станок, создавали «неограниченное количество» тепла. Сам Румфорд не вычислял механического эквивалента, но вычисления, основанные на его записях работы лошадей и нагревания воды, согласно Джоулю, позднее привели к указанной оценке	5 или 6
1799	Дэви	Трение двух кусочков льда один о другой, по его мнению, вызывает их таяние. Пользуясь часовой пружиной, он с помощью трения расплавлял в вакууме воск. (Эксперименты слишком грубы, чтобы служить истинной проверкой, но опыты Дэви сильно повлияли на взгляды других ученых.)	
1842	Майер	Предложил термин «механический эквивалент тепла» и оценил его, исходя из удельной теплоемкости газов, но использовал неточные данные и делал произвольные допущения	3,5
1839— 1843	Джоуль	Экспериментировал с электрическим током; он интерпретировал эффект нагревания и химический эффект на основе растущей веры в пещто, похожее на сохранение энергии, рассматривая теплоту как форму движения	

Год	Экспериментатор	Метод	Результат в единицах <i>Кал</i> на тыс. <i>дж</i>
1843	Джоуль	Построил простую электрическую машину, которая могла использоваться либо как генератор, либо как мотор. Приводя ее как генератор в движение падающими грузами, он измерял теплоту, созданную движением тока по катушке, погруженной в воду. (Роль катушки на деле выполнял статор машины.) Вычитание результатов эксперимента с включенным магнитом («холостой ход») из результатов с включенным магнитом («рабочий ход») позволило ему учесть трение в подшипниках и т. д.	$\left\{ \begin{array}{l} 4,76 \\ 5,38 \\ 5,60 \\ 4,90 \end{array} \right.$
1843	Джоуль	Та же машина использовалась как мотор. (А) Мотор, приводимый в движение батареей, поднимал груз. (Б) Батарея создавала тот же ток и нагревала провода (на самом деле устройство было сложнее, но идея та же самая) Улучшенная установка, описанная выше	$\left\{ \begin{array}{l} 5,51 \\ 3,15 \end{array} \right.$ 4,62, 4,62, 3,95
1843	Джоуль	Вода пропусклась по тонким трубкам и нагревалась за счет внутреннего трения в жидкости. Измерялась сила, с которой поршень с очень маленькими отверстиями «продавливался» через воду в цилиндре	4,42
1844	Джоуль	Воздух, сжимаемый последовательными движениями компрессора, нагревался. Сосуд со сжатым воздухом помещался в большую массу воды для отвода и измерения количества тепла. При вычислении пот-	4,22

Год	Экспериментатор	Метод	Результат в единицах <i>Кал</i> на тыс. <i>дж</i>
		ребленной механической энергии Джоуль учитывал изменение сжимающей силы вследствие изменения давления по «закону Бойля»	
1845	Джоуль	То же устройство, но с большим сжатием	4,27
1845	Джоуль	Сжатый воздух в сосуде, помещенном в водяную ванну, расширялся до атмосферного давления, охлаждаясь за счет этого	4,08 4,37 4,91
1845	Джоуль	Приводимая в движение падающими грузами крыльчатка перемешивала воду и за счет трения в жидкости нагревала ее. (Первая форма эксперимента Джоуля.)	4,80
1847	Джоуль	Усовершенствованная крыльчатка, перемешивающая воду. (Джоуль накручивал на барабан веревку с грузами и, чтобы получить достаточное повышение температуры, заставлял их падать по 20 раз. Он учитывал потерю тепла на нагревание воздуха и потерю кинетической энергии при ударе грузов о пол.)	4,21
		В том же устройстве вместо воды использовался китовый жир (с учетом измеренной удельной теплоемкости жира)	4,22
		В том же устройстве использовалась ртуть	4,24
1848	Джоуль	В том же устройстве перемешивалась вода. Было сделано 40 опытов с еще большей точностью. Джоуль полагал, что погрешность этих результатов составляет 0,5%	4,15

Год	Экспериментатор	Метод	Результат в единицах <i>Кал</i> на тыс. <i>дж</i>
1850	Джоуль	В том же устройстве перемешивалась ртуть	4,16
1850	Джоуль	Нагревание железных плиток трением	4,21
1857	Фавр	При одном и том же токе и продолжительности работы батареи создавала механическую энергию или теплоту	4,17—4,54
1857	Хирн	Сверление металла тупым сверлом	4,16
1861	Хирн	Охлаждение водой металлического тормоза	4,23
	Хирн	Нагревание воды при прохождении ее через узкую трубку под высоким давлением	4,16
	Хирн	Расплющивание свинца. (Маятник-молот 300 $\kappa\Gamma$ со скоростью 4,5 м/сек ударял по куску свинца 2,5 $\kappa\Gamma$ на каменной наковальне массой 1 т . Свинец нагревался примерно на 5°C.)	4,17
	Хирн	Охлаждение сжатого воздуха при расширении в атмосферу	4,31
	Хирн	Паровая машина (переход <i>теплоты</i> в <i>механическую энергию</i>). Арендовалась заводская паровая машина, для которой определялось полное количество тепла, переданное топкой пару; далее вычислялись затраты тепла на излучение, в конденсаторе и т. д. и определялась полученная механическая энергия	4,12—4,23
1858	Фавр	Трение металлов в ртути	4,05
1857— 1859	Вебер Фавр Зильберман Джоуль	Косвенные электрические методы. Измерялась теплота, выделяемая током в проводах или в химических батареях. Оценка механической	{ 3,9 4,2 4,2 4,2 4,1

Год	Экспериментатор	Метод	Результат в единицах Кал. на тыс. бэе
	Боша Ленц и Вебер	кой энергии производилась косвенно по электрическим приборам (амперметру, вольтметру и/или омметру). Электрические единицы еще не были твердо установлены, так что результат ненадежен	{ 4,1 3,9—4,7
1865	Эдлунд	Расширение и сжатие металлов	4,35, 4,21, 4,30
1867	Джоуль	Количество тепла, выделенного известным током на известном сопротивлении	4,22
	Вебер	То же	4.21
1870	Виолле	Вращающийся в магнитном поле диск нагревался вихревыми электрическими токами. Измерялся механический момент и выделение тепла	4.26 4,26 4,27
1875	Пулуй	Трение металлов	4,167—4,180
1878	Джоуль	Перемешивание воды крыльчаткой; усовершенствованная установка (среднее из 34 опытов)	4,158 (5)

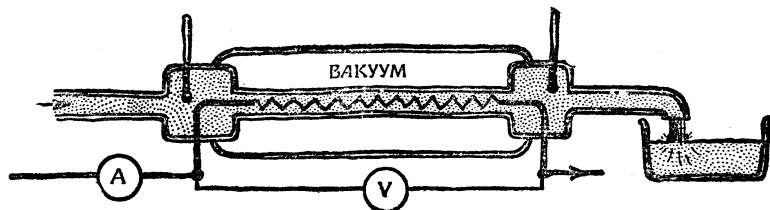
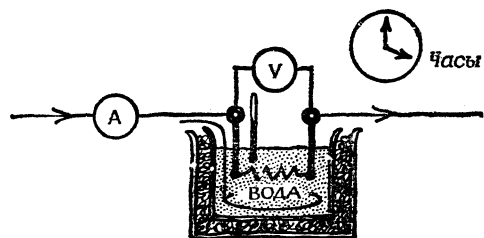
Тем временем и другие экспериментаторы представили новые доказательства. Во Франции Хирн сделал схожие с Джоулем сравнения и, кроме того, добавил еще два новых, хотя и грубых, но важных опыта, поскольку они отличались от остальных. С помощью огромного железного молота в виде маятника он расплющивал кусок свинца о каменную наковальню. При этом измерялась кинетическая энергия маятника до удара с учетом остаточной кинетической энергии и потери ее сравнивались с теплотой, выделившейся в неупругом свинце. Хирн производил также и обратные измерения, когда теплота *исчезала*, а механическая энергия появлялась. Он арендовал обычную фабричную машину и измерял поступавшее количество тепла и выход механической энергии. Он определял теплоту горячего пара, вычитал из нее теплоту, растрченную в воздух, и т. д., и сравнивал остаток с увеличением механической энергии.

Посмотрите же теперь на все «улики» и судите сами. Получился длинный список результатов — от первых грубых прикидок до прецизионных измерений. Коэффициент перехода выражен в современных единицах — *дж/Кал*. Если вы рассмотрите работы самого Джоуля, то поймете, почему единица энергии названа его именем.

Итак, все было ясно. Оставалось лишь узнать самые «пустяки». Величина механического эквивалента J измерялась теперь с такой точностью, что нужно было пользоваться более точным значением ускорения силы тяжести g , а величина 1 *Кал* зависела от того, взвешивалась ли вода бронзовой гирей в 1 *кг* в воздухе или вакууме. Кроме того, стало ясно, что при повышении температуры воды от 10 до 11° С и от 17 до 18° С требуется разное количество тепла. Если, по определению, в качестве 1 *Кал* мы возьмем удельную теплоемкость при 20° С (удобная комнатная температура), то при более низкой температуре она будет несколько больше. Так что для измерений с точностью до 0,1% и выше мы должны договориться, при какой температуре определяется *Калория*.

За последние восемь лет было проделано много точных измерений величины J . Ниже приведены некоторые результаты, полученные при взвешивании в вакууме и использовании «двадцатиградусной Калории» (т. е. определенной нагреванием воды от 19,5 до 20,5° С).

1878	Джоуль	Перемешивание воды. Результаты предыдущего эксперимента пересчитаны на взвешивание в вакууме и измерения газовым термометром	4,172
1879	Роуланд	Перемешивание воды крыльчаткой, приводимой в движение паровой машиной. Большое внимание было уделено конструкции прибора и точности измерения температуры	4,179
1892	Мицелеску	Перемешивание воды	4,166
1899	Каллендер и Барнес	Нагревание электричеством непрерывного потока воды. Повышение температуры измерялось также электрическими методами	4,183
1927	Леби и Геркус	Перемешивание воды	4,1802 ± 0,0001
1939	Осборн и др.	Нагревание воды электричеством	4,1819



Непрерывный поток воды, нагреваемый током

Фиг. 86. Опыты Каллендера и Барнеса.

Косвенные методы используют электрические измерения. Амперметр градуируется по силе взаимодействия катушек с током. Вольтметр градуируется на примитивном генераторе, дающем э. д. с., которую можно вычислить из простой геометрии, измеренного тока и скорости вращения.

Так в конце концов было установлено, что теплота, химическая и электрическая энергии способны к взаимным превращениям с потенциальной и кинетической энергиями и представляют собой различные формы универсальной сохраняющейся энергии.

Но энергия измерялась в разных единицах: потенциальная и кинетическая энергии в единицах работы, таких, как (ньютон)·(метр), а теплота — в кг воды на 1°C , или *Калориях*. Химическая энергия измерялась косвенно в тепловых единицах. Электрическая энергия могла измеряться в любых единицах. Мы использовали отношение этих единиц (1 Кал): ($1\text{ ньютон}\cdot\text{м}$) как «улику» против теплорода. Если теперь мы пришли к выводу, что *теплота — это форма энергии*, то их отношение должно быть универсальным, и нам необходимо точное значение этой величины. Взяв среднее из наиболее точных измерений, мы можем сказать, что

$$\begin{aligned}\text{Калория при } 20^{\circ}\text{C} &= 4180\text{ дж}, \\ \text{Калория при } 15^{\circ}\text{C} &= 4184\text{ дж}.\end{aligned}$$

Поэтому при вычислении можно пользоваться приближенным значением 4200 дж/Кал .

Термодинамика

Итак, был установлен общий закон:

Теплота и механическая энергия могут переходить друг в друга с постоянным коэффициентом перехода.

Это утверждение мы называем *первым началом* термодинамики. В своей наиболее общей форме оно включает и такое утверждение, как «вечный двигатель невозможен». Мы установили этот закон на основе множества экспериментов, но при этом интересовались лишь такими вещами, как количество тепла, величина потенциальной энергии. Мы не вникали в детали и не ставили вопросов: какие химические реакции происходят в батарее? Колеблются ли атомы расплющиваемого свинца? Такой общий подход характерен для термодинамики — и он противоположен подходу атомной физики, изучающей сначала детали механизма атомных процессов, а затем на их основе делающей выводы.

Общее рассмотрение тепловых машин приводит ко *второму началу* термодинамики:

Теплота сама по себе не может переходить от холодного тела к теплому.

Это простое, почти тривиальное утверждение вместе с первым началом превращается в мощную теорию. Термодинамика приводит к кельвиновской шкале температур, является основой всех тепловых машин от паровоза до двигателя современной ракеты, основой теории холодильников и «перекачивания» тепла, дает возможность делать разнообразные полезные предсказания, например устанавливать связь между напряжением батареи и химическими реакциями в ней, или утверждать, что

поток излучения $\sim T^4$.

Общность подхода, лежащего в ее основе, придает ей еще большую силу, ибо изменения деталей внутреннего механизма процессов в системе не могут повлиять на ее заключения.

Когда к термодинамике добавляют молекулярную картину строения вещества, она превращается в «статистическую механику», которая исследует законы хаотического движения. Благодаря этому термодинамика связывается с атомной физикой. А в последнее время примененная вместо молекул к «битах информации», она перевернула теорию и практику связи.

Физика XIX века

В начале прошлого века энергия была идеей, не имевшей прочной репутации. Но благодаря Джоулю и многим другим возникло представление о сохранении энергии: механическая переходит в тепловую, тепловая в механическую — баланс всюду сходился; химическая энергия превращалась в тепловую или сначала в электрическую, а затем в тепловую, электрическая энергия в химическую, а затем в тепловую — все это было обнаружено в массе опытов, которые проверялись и перепроверялись. Баланс все равно сходился.

Это был век торжества науки. В начале века утвердилась химия, и незадолго до этого был открыт электрический ток; в середине столетия наука об электричестве и электротехника стали развиваться гигантскими шагами, а в конце зародилась атомная физика. Но величайшим достижением, по-видимому, явилось установление закона сохранения энергии, причем энергия стала фундаментальным понятием, связавшим все воедино.

«Опыты Джоуля» в лаборатории

Работы Джоуля и его установки были чудом экспериментальной точности. Обычно результаты опытов искажаются потерями тепла. Чтобы оценить работу Джоуля, вам предстоит исследовать в лаборатории сохранение энергии. Но при этом вряд ли удастся добавить что-либо к полученным Джоулем экспериментальным доказательствам. Ваша работа скорее направлена на то, чтобы вызвать чувство уважения к Джоулю в его борьбе с трудностями и восхищение его искусством.

Опыт. Измерение перехода потенциальной энергии силы тяжести в теплоту при падении свинцовой дроби (грубый эксперимент). Положите горсть свинцовой дроби в закрытую картонную трубку и быстро переверните ее так, чтобы дробь пролетела всю высоту трубки. Резко переверните трубку еще и еще раз, подряд раз 50. С помощью ртутного термометра измерьте температуру дроби, высыпав ее в бумажный стаканчик, до и после серии переворачиваний. При каждом переворачивании трубки свинец приобретает гравитационную потенциальную энергию за счет энергии переворачивания трубки. При падении дроби ее потенциальная энергия превращается в кинетическую, которая затем при неупругом ударе дроби о дно переходит в теплоту.

Вычислите полную потенциальную энергию, потерянную дробью, и приращение количества тепла. Допустив, что весь запас потенциальной энергии переходит в теплоту и что теплота не теряется, вычислите механический эквивалент J , т. е. количество потенциальной энергии в Джоулях, превратившейся в 1 Кал тепла.

После выполнения этого опыта подумайте об его усовершенствовании. Что лучше: увеличить число переворотов, добавить дроби, удлинить трубку или взять другой термометр? Некоторые из этих изменений можно исследовать с помощью рассуждений, другие же требуют опытной проверки. Однажды группа учащихся сделала целую серию опытов, которые ясно показали, как одно из этих изменений может улучшить все дело.

Это очень неточный эксперимент. Не думайте, что его результат будет в согласии с Джоулем и вряд ли можно избавиться от главных ошибок путем проведения многих опытов.

1) Если хотите, взвесьте дробь или объясните, почему это не обязательно.

2) Удельную теплоемкость свинца примите равной 0,035 или посмотрите ее в таблицах.

3) Нарисуйте трубку и укажите, где находится дробь: а) в верхнем положении, б) в нижнем.

С помощью этого рисунка определите, какую нужно брать высоту падения.

4) Когда дробь заканчивает свое падение, дно трубки должно находиться на твердом столе. Если вы держите трубку в руке, то удар «смягчается», так как ваша рука пружинит, и значительная часть кинетической энергии дроби отдается руке. С другой стороны, если при переворачивании вы сдвинете трубку вверх, а затем стукнете ею по столу, дробь будет падать с большей кинетической энергией, нежели дает расчет.

5) Почему мы советуем сделать 50 переворотов? После 5 переворотов температура возрастает слишком мало, а после 5000 установится постоянная температура. Почему? Что лучше: 10, 20, 50 или 100 переворотов?

Если у вас есть приборы для более серьезных измерений — воспользуйтесь ими.

Задача 1. Опыт Джоуля и водопад

Водопад дает возможность провести эксперимент по перемешиванию воды в огромном масштабе. Джоуль проводил свой медовый месяц в Швейцарии, там он измерял разность температур между верхним и нижним уровнями водопада высотой около 50 м.

- а) Предположив правильность идеи Джоуля, оцените ожидаемую разность температур, для чего:
 - 1) вычислите потерю потенциальной энергии 2 л воды;
 - 2) вычислите повышение температуры, считая, что потенциальная энергия этих 2 л воды превращается в теплоту (допустим, вы знаете, что $1 \text{ Кал} = 4200 \text{ дж}$).
- б) Объясните, почему повышение температуры не зависит от массы воды, выбранной для расчетов?
- в) Почему измерения нужно проводить в безветренный день? Чем плох ветренный день?
- г) Даже в тихий день предсказанную разность температур могут дать только некоторые водопады. Опишите или нарисуйте типы водопадов, которые не дадут разности температур.

Задача 2. Измерение температуры в опыте Джоуля

Крыльчатка в опыте Джоуля вращалась с помощью двух падающих грузов по 14 кг каждый. Груз опускался приблизительно на 2 м, затем Джоуль вновь накручивал веревку и отпускал грузы. В каждом опыте проводилось 12 таких падений. Эффективная масса воды в калориметре составляла около 7 кг. (Сюда включалась и поправка на калориметр, крыльчатку и т. п.)

Допустим теперь, что коэффициент перехода между механической потенциальной энергией и теплотой составляет 4200 дж на каждую Калорию. Найдите возрастание температуры воды. (Это, конечно, искажение реального опыта. Джоуль измерял повышение температуры и отсюда выводил величину J . Однако было бы неправильно идти по этому пути, не приняв во внимание многочисленных поправок Джоуля и не используя его точные измерения. Вычисления, которые здесь требуются, покажут вам масштаб повышения температуры, которую должен был измерять Джоуль.)

«Конструкция перегородки. При атмосферном давлении средний свободный пробег молекул имеет порядок десятитысячной доли миллиметра, или десятой доли микрона. Чтобы обеспечить истинный, «диффузионный» поток газа, диаметр бесчисленного множества отверстий в перегородке должен быть меньше одной десятой среднего свободного пробега. Следовательно, материал перегородки должен иметь миллионы отверстий диаметра, меньшего или равного 0,01 микрона ($4 \cdot 10^{-7}$ дюйма), и почти не содержать отверстий с диаметром, превышающим эту величину... Даже при допущении атмосферного давления по одну сторону и полного вакуума — по другую ... установка большого масштаба, как показывают расчеты, требует перегородок общей площадью во много акров».

Г. Д. Смит,
«Атомная энергия для военных целей»¹⁾

Скорость молекул и температура

Теперь мы можем продолжить молекулярную теорию газов и разобраться с энергией:

$$\text{ДАВЛЕНИЕ} \cdot \text{ОБЪЕМ} = \frac{1}{3} N m \bar{v}^3 = \frac{2}{3} \text{КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ МОЛЕКУЛ.}$$

По шкале газового термометра $P \cdot V$ служит мерой *абсолютной температуры* T . Следовательно,

$$\text{КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ МОЛЕКУЛ} \sim T,$$

а

$$\text{СРЕДНЯЯ СКОРОСТЬ} \sim \sqrt{T}.$$

Задача 1. Температурные эффекты

- а) Найдите точную зависимость от температуры скорости звука в воздухе.
- б) Предскажите зависимость от температуры скорости проникновения газа через пористую перегородку. (Вопрос поставлен слишком неопределенно, чтобы ответ имел ясный практический смысл. Для определенности при-

¹⁾ Трансжелдориздат, М., 1945.

жем, что вся диффузионная установка нагревается в замкнутом объеме. В противном случае газ при нагревании станет более разреженным и вы не получите ожидаемой выгоды.)

Но как все-таки сравнить разные газы при одной и той же температуре? Нам необходимо вполне определенное правило, которое помогло бы предсказывать их свойства и проектировать диффузионные заводы, скажем для разделения изотопов. Правило оказывается простым.

Скорости молекул

Даже в газе, состоящем из одинаковых молекул, разнообразие скоростей огромно. Средняя скорость молекул при данной температуре имеет вполне определенную величину, однако отдельные молекулы при каждом соударении изменяют свою скорость, двигаясь иногда быстрее, а иногда медленнее. Допустим, что мы можем заставить некоего «демона» наблюдать за молекулой и через каждую миллионную долю секунды записывать ее скорость. Тогда полученные им результаты будут выглядеть так, как это представлено на фиг. 87. Они изобразятся колоколообразной кривой, характеризующей хаотическое движение, скорость которого в большинстве случаев близка к среднему значению. Аналогичное распределение скоростей получится и на моментальной фотографии молекул газа. Такой график называется «максвелловским распределением», по имени Джеймса Клерка Максвелла, который первый дал описание движения молекул газа более века назад.

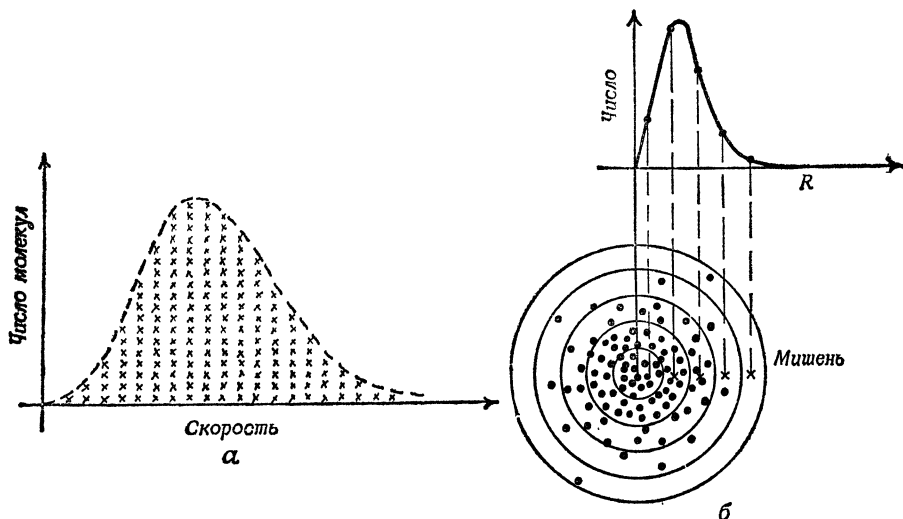
При наличии смеси двух газов приходится следить за двумя сортами молекул, которые при каждом соударении обмениваются импульсами и энергией. Наш «демон», потрудившись изрядно и записав все тщательно, должен был бы дать нам сведения о скорости, импульсе и кинетической энергии каждого сорта молекул. К сожалению, такого «демона» у нас нет, а сами мы рядом с молекулами слишком неуклюжи и огромны и не способны наблюдать их по отдельности. Однако при некоторых предположениях мы можем проделать эту работу в уме.

Предположим, что:

1) молекулы движутся хаотически, они столь многочисленны и сталкиваются так часто, что оправдано статистическое рассмотрение;

2) при каждом соударении импульс сохраняется, т. е. молекулы подчиняются тем же законам столкновения, что и упругие шары;

3) при каждом соударении кинетическая энергия сохраняется;



Фиг. 87. График распределения по скоростям (I).

а — число молекул (гистограмма), изображающее распределение по скоростям в газе. Каждый крестик на графике показывает молекулу, скорость которой лежит в маленькой окрестности скорости *v*.

П р и м е ч а н и е. Каждому крестикку левой части соответствует медленная молекула, а правой — быстрая (в данный момент). Максимум дает наиболее «популярную» скорость. Средняя скорость расположена недалеко от нее.

б — такая же колоколообразная кривая, показывающая шансы промаха стрелка, когда он целится прямо в «яблочко» мишени. (Один и тот же «закон случая» применим как к случайным вздрагиваниям руки стрелка, так и к молекулярным скоростям при хаотических упругих соударениях в газе.) Кривая *б* нарисована для обычной плоской мишени с кругами равной ширины; кривая *а* давала бы вероятность попадания в трехмерную мишень со сферическими зонами.

происходит упругое соударение ¹⁾, в противном случае молекулы через долю секунды падали бы на дно сосуда.

Пометим теперь любые две сближающиеся, сталкивающиеся и разлетающиеся молекулы номерами 1 и 2 и запишем простые алгебраические уравнения:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Полный} \\ \text{импульс} \\ \text{до соударения} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Полный} \\ \text{импульс} \\ \text{после соударения} \end{array} \right),$$

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2,$$

¹⁾ Мы считаем пока, что у молекул нет способа «избавиться» от энергии или хранить про запас дополнительную потенциальную энергию. Кинетическая энергия во время соударения на мгновение переходит в потенциальную, после чего она полностью высвобождается.

$$\left(\begin{array}{c} \text{Полная кинетическая энергия} \\ \text{до соударения} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Полная кинетическая энергия} \\ \text{после соударения} \end{array} \right)$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2.$$

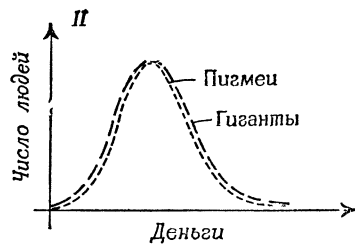
Одно соударение — лишь небольшой штрих в общей картине. Эти уравнения нужно написать для миллиардов соударений и просуммировать по громадному множеству молекул. Результат оказывается простым: *при смешении газов А и В молекулы обоих типов будут обладать одной и той же средней кинетической энергией*

$$\frac{1}{2} m_A \overline{v_A^2} = \frac{1}{2} m_B \overline{v_B^2}.$$

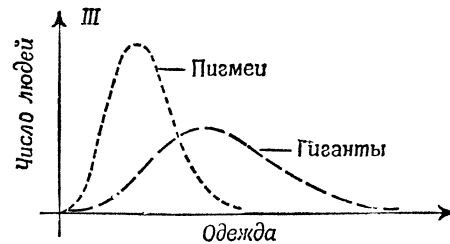
Чтобы получить этот результат, нам нужна не таинственная физика, а высшая математика для усреднений, и придется еще позвать на помощь статистика. Он занимается той же работой, но в других областях. Например, для страховых компаний он усредняет продолжительность жизни многих людей в разных ситуациях. Продолжительность отдельной жизни может сильно отличаться от средней, но само среднее — удивительно надежная величина. Благодаря ей страховые компании оправдывают свои миллионные вложения. В газе же имеют дело с гораздо большим числом «клиентов» и событий, нежели любая страховая компания. В наперстке воздуха более 50 000 000 000 000 000 000 молекул, каждая из которых сталкивается миллиарды раз в секунду. Поэтому, хотя и следует ожидать индивидуальных флуктуаций, как в броуновском движении, усреднение дает надежные статистические предсказания ¹⁾.

Чтобы уяснить себе статистическую задачу, рассмотрим воображаемую социологическую ситуацию. Посадим на необитаемый остров миллион гигантов и миллион пигмеев, снабдив их деньгами, топливом, пищей и т. п. А теперь спросим статистиков: «Каково будет распределение среди гигантов и пигмеев через несколько лет?» Статистик потребует от нас уточнения: «Распределение чего? Денег? Одежды? Роста?» Свой ответ статистик может представить нам в виде графиков *а* и *б* на фиг. 88. Даже если мы потребуем, чтобы были сохранены первоначальные деньги и одежда (старые

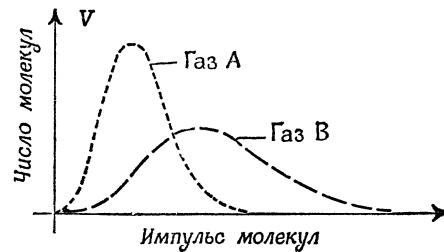
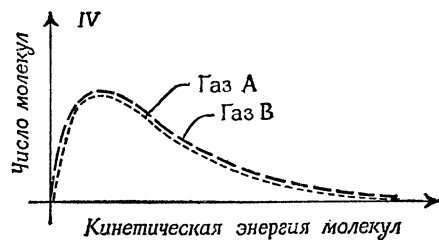
¹⁾ При отклонении от среднего страховые компании с небольшим капиталом могут просто лопнуть (но им может и «повезти»), а для страховой компаний с большим капиталом такие флуктуации благополучно усредняются. Так, от броуновского движения страдают носящиеся в воздухе бактерии, а воздушный шар испытывает лишь постоянное атмосферное давление.



а



б



Фиг. 88. Графики распределений (II, III, IV, V).

Молекулы на графике V сгруппированы в соответствии с величиной Mv независимо от направления скорости.

платья просто перешиваются), то должны ожидать одного и того же среднего для денег и разного среднего для одежды.

Вернемся к молекулам. Статистик скажет нам, что для любой смеси молекул распределение по *кинетическим энергиям* будет одним и тем же, с одинаковым средним значением у молекул различных типов ¹⁾. *Распределение по импульсам будет различным.* (Среднее значение *импульса*, разумеется, в отсутствие ветра равно нулю. Здесь же мы говорим о *величине* Mv безотносительно к ее направлению.)

Равномерное распределение энергии

Этот статистический результат называется *равномерным распределением энергии*. В любой смеси газов энергия распределяется между молекулами так, что *средние кинетические энергии молекул разного типа оказываются одинаковыми*. То же справедливо и когда газы не смешиваются, а содержатся в отдельных контейнерах, но при одной и той же температуре, ибо тогда их можно смешать без каких бы то ни было изменений. Следовательно, если два газа A и B находятся при одинаковой температуре, то

$$\frac{1}{2} m_A \overline{v_A^2} = \frac{1}{2} m_B \overline{v_B^2}.$$

Этот закон равномерного распределения энергии оказывается очень полезным. Рассмотрим в этой связи следующие задачи.

Задача 2. Скорость диффузии

Предполагая применимость равномерного распределения энергии, предскажите отношение скоростей диффузии двух газов A и B из резервуара с высоким давлением в вакуум через пористую перегородку.

Задача 3. Разделение изотопов урана

Для атомных бомб и реакторов на обогащенном уране необходимо отделять легко расщепляющийся изотоп U^{235} от обычного изотопа U^{238} , который мешает делению. Это достигается диффузией в огромном масштабе. Твердый уран химически переводится в газообразный фторид урана UF_6 , диффундирующий через мелкие поры в специальной перегородке (см. фиг.16—18, стр. 358—360). Следуя изложенным ниже рассуждениям, установите возможный выход газа.

1) Химические эксперименты и рассуждения показывают, что молекула кислорода состоит из двух атомов, поэтому мы записываем ее как O_2 , молекула

¹⁾ Легко сказать: «Одинаковые распределения можно получить из общих соображений». Но ведь те же общие соображения дали бы одинаковые распределения и по импульсам, а это неверно. Нет, статистическое доказательство не так уж просто и очевидно.

водорода также составлена из двух атомов, H_2 , а молекулы фторида урана имеют состав UF_6 .

2) Химические измерения говорят нам, что относительные массы отдельных атомов O, H и F и обычного урана равны 16, 1, 19 и 238. Все это в шкале, где легчайшему атому, H, приписывается масса 1 (точнее, 16,0000 ... — изотопу кислорода O^{16}).

а) Какова, по вашему мнению, будет скорость молекул кислорода по сравнению с молекулами водорода при той же температуре? Из соотношения (масса O_2) / (масса H_2) = 32/2 и равномерного распределения энергии (без возвращения к $PV = \frac{1}{3} \dots$) вычислите отношение

(средняя скорость H_2) / (средняя скорость O_2).

б) Повторите эти же сравнения для O_2 и UF_6 . (Относительная масса UF_6 равна, конечно, не просто 238, а 238 для U плюс $6 \cdot 19$ для F, т. е. $238 + 114 = 352$.)

в) Вспомните теперь, что существует несколько сортов (изотопов) урана. В естественной смеси изотопов урана, полученной из руды, большинство атомов имеет относительную массу 238, редкого изотопа 235 в смеси всего 0,7%; его-то как раз и нужно отделить. Предположим, что через пористую перегородку диффундирует смесь ($U^{238}F_6$ и $U^{235}F_6$). Более легкие молекулы UF_6 отличаются по средней скорости от более тяжелых, поэтому в продиффундировавшей смеси получается другая пропорция изотопов. Будет ли новая смесь относительно богаче или беднее $U^{235}F_6$?

г) Объясните ваш ответ.

д) Установите процентную разницу между средними скоростями $U^{238}F_6$ и $U^{235}F_6$. (П р и м е ч а н и е. Как показано в гл. 11¹⁾, изменение некой измеряемой величины Q на x% для $\sqrt{Q}$ дает изменение $\frac{1}{2}x\%$.)

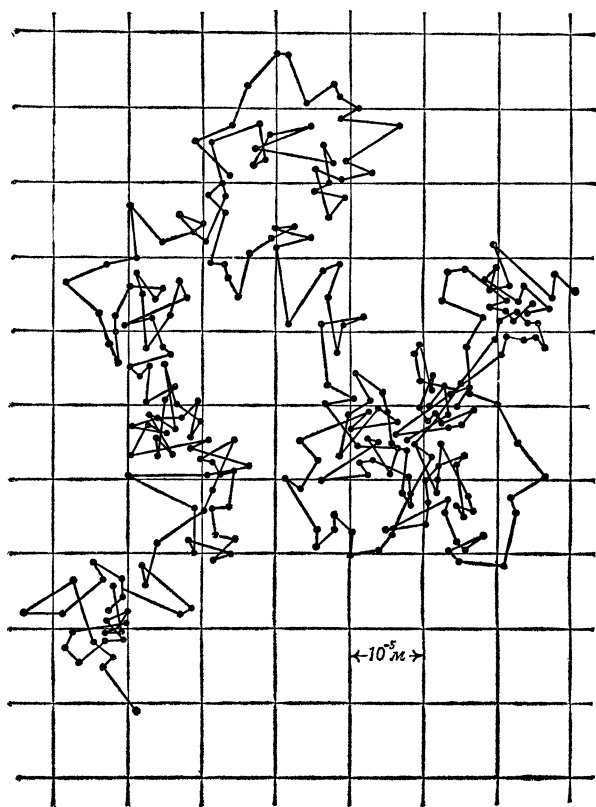
е) Найденное выше различие средних скоростей иллюстрирует то мизерное изменение, которое дает диффузия на пути от природной смеси с 0,7% $U^{235}F_6$ к желаемому продукту, содержащему, скажем, 99% $U^{235}F_6$. Поэтому в каскадной диффузионной системе (см. фиг. 18, стр. 360) необходимо множество стадий. Сколько, по-вашему, потребуется последовательных стадий: дюжина? тысячи? миллионы? (Выберите разумное число.)

Масса молекул

С помощью равномерного распределения энергии мы действительно можем определить массу молекул. Суть идеи иллюстрирует приводимая ниже задача 4. При этом достаточно косвенных экспериментальных измерений. По броуновскому движению частиц мы наблюдаем суммарный эффект, но не можем увидеть частных ударов молекул. Молекулярное движение безнадежно скрыто от нас. Мы можем регистрировать положение какой-то частицы через равные интервалы времени и измерять расстояние, пройденное за каждый интервал. Но это снова статистические данные и нам снова нужна помощь математики. Эйнштейн и другие показали,

¹⁾ Гл. 11 («Интерлюдия. Приложение по арифметике») входит в т. 1 настоящего издания.

как по записи блужданий частицы найти ее истинную скорость. На фиг. 89 показана траектория броуновского движения одной частицы, зарегистрированная знаменитым французским физиком Пэрреном. Он отмечал положение частицы через каждые 2 минуты.



Фиг. 89. Карта Пэррена.

Линии проведены по записям Пэррена и соответствуют расстоянию около 10^{-6} м ($1/100 \text{ мм}$) в воде. Масса частиц $\sim 10^{-16} \text{ кг}$.

«Обсчет» измерений привел затем к значению средней скорости частицы v_1 , а следовательно, и к массе толкающих частицу молекул. Сам метод, вообще говоря, не очень точен, если бы не золотые руки французского экспериментатора Пэррена, который посвятил этому годы своей жизни. Полученные им результаты согласо-

лись с более надежными оценками, сделанными на основе измерений отношения *заряда к массе* для ионов и величины заряда электрона.

Задача 4. Измерение массы отдельной молекулы

Равномерное распределение энергии — вещь настолько общая, что ее можно применять и к броуновскому движению частицы пепла, пляшущей среди молекул воздуха. Предположим, что удалось измерить среднюю скорость частицы v_1 и ее массу m_1 .

- Объясните, как можно вычислить массу отдельной молекулы?
- Скажите, какая еще экспериментальная информация нужна для ответа?
- Откуда взять эту дополнительную информацию?

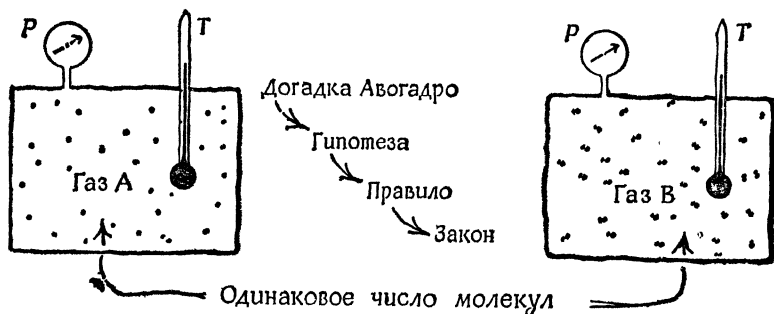
Задача 5. Масса «молекул воздуха»¹⁾

Вот данные, которые можно получить из броуновского движения. Правда, они искусственны и получены не из эксперимента, который должен был бы быть непосредственным, но зато типичны для реального броуновского движения. Наблюдения дают среднюю скорость случайного движения частицы пепла (масса которой 10^{-14} кг — одна стомиллионная миллиграмма), равную примерно 10^{-3} м/сек (1 мм/сек).

Найдите массу «молекулы воздуха». (Точность вашего результата будет не выше 10—30%, но для такой фундаментальной величины важна даже грубая оценка. Здесь дело в принципе, а не в точности.)

Задача 6. Закон Авогадро

Свыше века назад итальянский ученый Авогадро, предложив блестящую гипотезу, вывел химию из серьезного тупика. Авогадро предположил, что



Фиг. 90. К задаче 6.

равные объемы разных газов содержат одно и то же число молекул (при одной и той же температуре и давлении). Это позволило простым способом — взве-

¹⁾ Здесь и ниже автор говорит о «молекуле воздуха». На самом деле, конечно, таких молекул нет. Просто для грубых оценок различие масс и размеров молекул O_2 и N_2 несущественно. — Прим. ред.

шиванием равных объемов двух газов — сравнивать массы молекул. Полученные результаты согласовались с данными других источников, и химики порывались рассматривать «гипотезу» Авогадро как «закон». Сейчас, применив равномерное распределение энергии, вы сможете доказать его. Допустим, что газы А и В при одинаковом давлении Р занимают равные объемы V (фиг. 90). Газ А состоит из N_A молекул с массой m_A , а газ В — из N_B молекул с массой m_B . Напишите для каждого из газов предсказание кинетической теории $PV = \frac{1}{3} \dots$, используя равномерное распределение энергии, докажете равенство $N_A = N_B$, которое и составляет содержание закона Авогадро.

Задача 7. Химическая логика

Вот как закон Авогадро используется в химии. Если смешать равные объемы водорода (H) и хлора (Cl), то вспышка света вызовет химическую реакцию (взрыв), в которой они, соединясь, образуют новый газ — хлористый водород HCl (в водном растворе — соляная кислота). (Если первоначальные объемы не равны, то избыток одного из газов остается неиспользованным.) Поэтому 1 л водорода и 1 л хлора дают 2 л смеси, а после взрыва — 2 л соединения хлористого водорода (когда газ остынет до первоначальной температуры).

- Если 1 л водорода содержит N молекул, то сколько молекул содержит 1 л хлора?
- Сколько образуется молекул соединения?
- Разделите общее число исходных молекул на число молекул соединения, опделите, сколько исходных молекул расходуется на образование одной молекулы хлористого водорода?
- Что можно заключить о числе атомов водорода в молекуле газа водорода?
- Дайте обоснование вашего ответа.

Задача 8. Предсказание удельной теплоемкости гелия

Не будем измерять удельную теплоемкость гелия, а, подобно фокуснику, «вытащим» ее из нашей «теоретической шляпы». Пусть тепловая энергия гелия равна кинетической энергии его молекул, так что:

- Из $PV = \frac{1}{3} \dots$ следует, что полная кинетическая энергия всех N молекул $N(\frac{1}{2} m \bar{v}^2)$ должна быть равна _____.
- Предположим, что вся эта кинетическая энергия есть теплота, поглощенная газом при нагревании его от абсолютного нуля до той температуры T, при которой он находится. Измерения газовым термометром показывают, что если газ находится при температуре таяющего льда, это соответствует температуре 273° С выше нуля. Полная масса газа равна Nm, а повышение температуры равно 273° С. Необходимая для нагревания теплота равна

МАССА · Δ (ТЕМПЕРАТУРЫ) · УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ

Комбинируя это с полученным выше результатом, найдите выражение для удельной теплоемкости через давление P, объем V, массу Nm или M и т. д.

- Примените это к гелию, используя следующие данные: 4 кг гелия при температуре таяния льда и давлении 1 атм (примерно 100 000 ньютон/м²) занимают 22,4 м³. Вычислите удельную теплоемкость гелия. Не забудьте, что вычисленная вами в п. 1 кинетическая энергия выражена в (ньютон) · (метр), или джоулях, а теплота, вычисленная в п. 2, выражена в Калориях.

Прежде чем ответить на вопрос, выразите обе величины в одинаковых единицах (1 Кал=4200 дж). (П р и м е ч а н и е. Вместо температуры тающего льда можете взять комнатную температуру 293°C выше абсолютного нуля и объем 24 м^3 .)

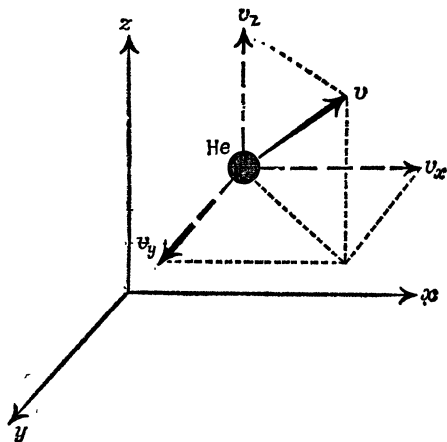
Удельная теплоемкость газов

Сравните ваше решение задачи 8 с экспериментальным значением удельной теплоемкости гелия, равным $0,74^1$. Предсказания и эксперимент согласуются очень хорошо. Измеряемое значение одно и то же при всех температурах, как это следует из вычислений. Следовательно, наша теория хорошо оправдывается.

Найдем теперь аналогичные данные для водорода. Если вместо 4 кг гелия мы возьмем 2 кг водорода в этом же объеме, то получим, что удельная теплоемкость должна быть около 1,5. Экспериментальное значение совершенно

Фиг.91. Поступательное движение.

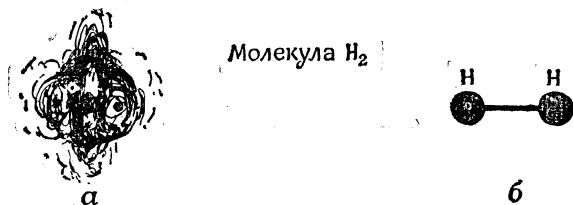
Атомы типа атома гелия обладают энергией поступательного движения. Любое такое движение можно разложить на три перпендикулярные составляющие вдоль осей x , y и z . Движение молекулы в каждом из этих трех направлений можно считать независимым.



другое — около 2,5. Таким образом, наша теория продержалась недолго. Это расхождение оказывается полезным для новой теории. Получаемое из статистической механики равномерное распределение энергии в общем случае касается не только кинетической энергии движения. Оно утверждает только, что «средняя кинетическая энергия у всех молекул одинакова». Оно поровну наделяет энергией все независимые типы движений молекулы. Для атомов гелия, которые мы представляли в виде крошечных круглых шариков, хаотическое движение можно разбить на три независимые компоненты: движение вверх — вниз, вперед — назад и влево — вправо в направлениях x , y и z . Это — поступательное движение молекул, поэтому энергию его мы называем поступательной кинетической энергией. Равномерное распределение энергии

¹⁾ Это удельная теплоемкость «при постоянном объеме». Измерения «при постоянном давлении» включают некую работу над поршнем при расширении газа и здесь нежелательны. Величина теплоемкости при «постоянном объеме» составляет для гелия около $\frac{3}{5}$ теплоемкости «при постоянном давлении».

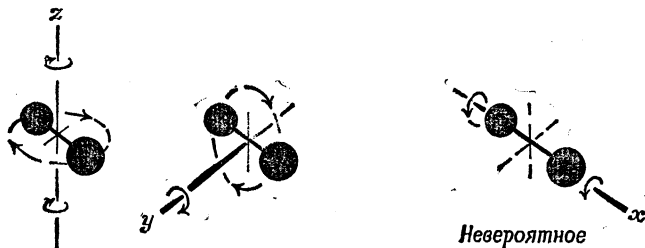
говорит нам, что энергия в среднем складывается из трех равных долей поступательного движения. Сумма этих трех ¹⁾ долей должна давать полную кинетическую энергию, которая равна $\frac{3}{2} PV$. Следовательно, на каждую



Фиг. 92. Молекула из двух атомов (типа H_2).

а — молекула представляет собой нечто «лохматое»; б — схематическое изображение такой молекулы в виде гантели.

долю поступательной энергии приходится $\frac{1}{2} PV$. Но в молекулу водорода входят два атома $H-H$, и она, кроме того что движется как целое, может еще вращаться наподобие гантели (фиг. 93), т. е. обладать и вращательной энер-



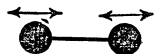
Фиг. 93. Вращательное движение.

Молекула из двух атомов (типа H_2) характеризуется двумя независимыми направлениями вращения. Здесь это вращения вокруг осей y и z .

гией. У такой гантели, вообще говоря, имеются три независимые оси вращения. Однако вращение вокруг третьей оси (оси гантели) возбудить при соударениях слишком трудно. Таким образом, необходимо учитывать две доли вращательной энергии, кроме трех долей поступательной, каждая из которых равна $\frac{1}{2} PV$. Следовательно, при расчете теплоемкости водорода надо иметь в виду, что теплота расходуется на увеличение не только поступательной, но и вращательной энергии, т. е. вместо трех долей нужно учитывать пять. Его удельная теплоемкость поэтому должна быть в $\frac{5}{3}$ раза больше наших предсказаний, а $\frac{5}{3} (1,5) = 2,5$; тогда согласие с экспериментальным результа-

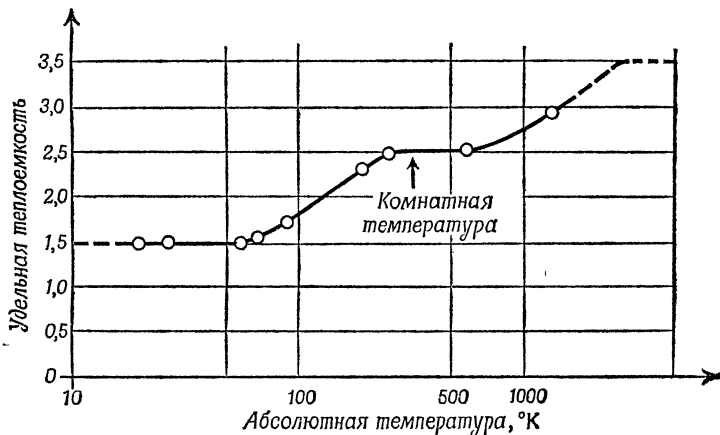
¹⁾ Скорость молекулы v можно разложить на три составляющие v_x , v_y , v_z в направлениях x , y и z , а теорема Пифагора говорит нам, что сумма квадратов этих трех составляющих равна v^2 . Следовательно, кинетическая энергия, отвечающая этим составляющим, складывается в кинетическую энергию молекулы.

том 2,40 оказывается очень хорошим. От этого же химики должны были бы прийти в восторг, ибо им не было известно, что такое молекула водорода! H_2 ? H_4 ? H_6 ? ..., теперь же они получили аргумент в пользу H_2 . К сожалению, все не так просто. Пара атомов в молекуле может еще колебаться друг относительно друга вдоль оси молекулы (фиг. 94). Колебательное движение



Фиг. 94. Колебательное движение вдоль оси молекулы. Это движение обладает потенциальной и кинетической энергиями.

ние потребует своей доли энергии, даже двойной доли, ибо любое колебание обладает как кинетической, так и потенциальной энергиями, а равномерное распределение обещает стандартную долю энергии каждой из них. Но тогда мы получили слишком много, 3,5. Экспериментальное значение теплоемкости водорода изменяется с температурой (фиг. 95). При очень низких температурах



Фиг. 95. Удельная теплоемкость водорода.

оно равно 1,5, в области комнатных температур 2,4, а при очень высоких — ползет к 3,5. Это как раз те значения теплоемкости, когда возбуждены такие движения:

Поступательное (3 доли)	удельная теплоемкость	1,5
Поступательное (3) + вращательное (2)	удельная теплоемкость	2,5
Поступательное (3) + вращательное (2) + колебательное (2)	удельная теплоемкость	3,5

Эти ступеньки для каждого из ожидаемых значений были загадкой, пока не сообразили, что они получаются из ограничений на вращательную и колебательную энергии — ограничений квантового типа. Квантовые правила,

возникшие из другого неожиданного поведения излучения, требуют, чтобы энергия на периодическое движение, такое, как колебания или вращение, бралась стандартными «порциями». Энергия каждой из таких «порций», или квантов, определяется правилом ¹⁾:

$$\left(\begin{array}{c} \text{ЭНЕРГИЯ} \\ \text{КВАНТА} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{УНИВЕРСАЛЬНАЯ} \\ \text{ПОСТОЯННАЯ} \end{array} \right) \cdot \left(\begin{array}{c} \text{ЧАСТОТА ПОВТОРЕНИЯ} \\ \text{ДВИЖЕНИЯ} \end{array} \right).$$

Таким образом, вращение или колебание с высокой частотой должно обладать энергией в виде одной, двух, трех, ... больших порций, возможно слишком больших, чтобы атом или молекула могли иметь хотя бы одну порцию для поддержания средней энергии, характерной для данной температуры. (Если бы сахар продавался и поедался только мешками по 100 кг, он исчез бы из рациона «среднего» жителя и лишь сказочным гигантам, пожалуй, такая норма была бы по вкусу.) Эти порционные ограничения на равномерное распределение энергии объясняют все особенности и предсказывают новые экспериментальные факты. Сообщим молекуле один квант энергии вращения. Это заставит ее вращаться очень быстро, ибо ее инерция вращения (момент инерции) довольно мала.

$$\text{КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ} = \frac{1}{2} (\text{МОМЕНТ ИНЕРЦИИ}) \cdot (\text{УГЛОВАЯ СКОРОСТЬ})^2.$$

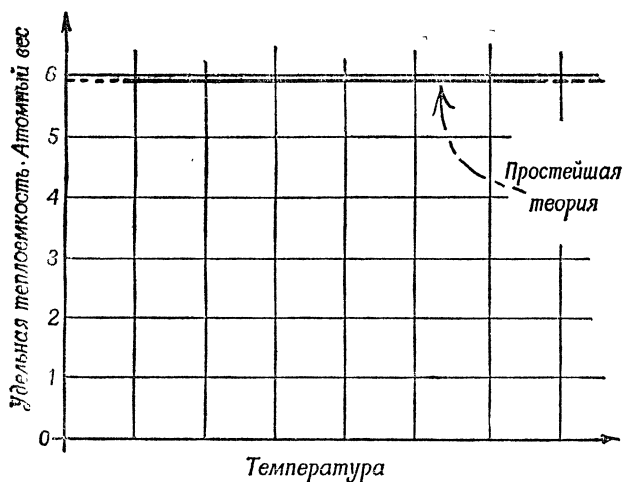
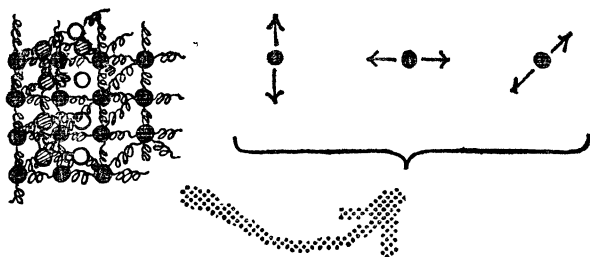
Но при быстром вращении молекулы кванты ее энергии должны быть большими. Поэтому молекулы поглощают энергию либо большими квантами, либо не поглощают вовсе и не вращаются. При низких температурах средняя доля энергии, положенная по закону равномерного распределения, оказывается гораздо меньше одного кванта, так что вращаться могут лишь немногие молекулы. При комнатной температуре средняя доля составляет несколько квантов, и равномерное распределение осуществимо.

Молекулы колеблются с *очень высокой частотой*, поэтому практически ни одна из молекул не может колебаться, пока газ не нагреет до *очень высокой температуры*.

Удельная теплоемкость твердых тел

Аналогичное рассмотрение можно применить и к колебаниям атомов в твердом кристалле (фиг. 96). Допустим, что атомы гелия сконденсировались в твердое тело. Каждый атом теперь привязан упругими силами к своему месту в кристаллической решетке. У него нет ни поступательного, ни вращательного движения, но он может колебаться в трех независимых направлениях, так что должен обладать шестью долями колебательной энергии вместо трех долей поступательного движения. Поэтому удельная теплоемкость твердого гелия должна быть вдвое больше чем 0,75, т. е. 1,5. Однако замороженный гелий ведет себя не так просто; снова возникают квантовые неприятности. Но поведение других твердых тел при более высоких температурах хорошо согласуется с этим предсказанием. Умножая предсказанное для гелия число 1,5 на его атомный вес 4, мы получаем 6,0. Если вы проследите за рассуждениями в задаче 8, то увидите, что переход к другому элементу дает ту же самую

¹⁾ Частота — это число полных циклов колебаний или вращений в секунду.

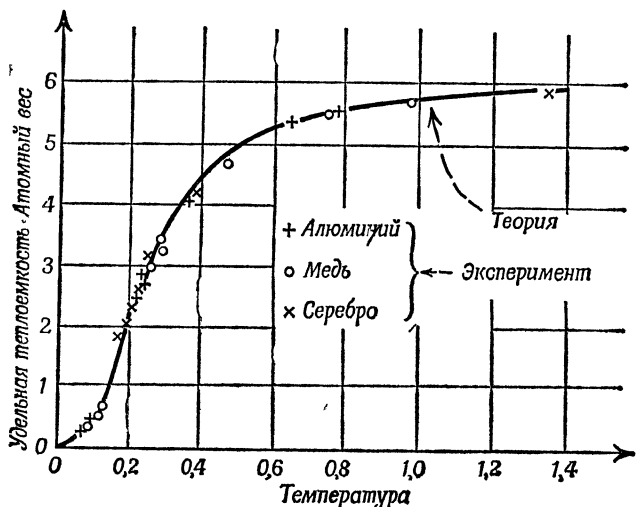


Фиг. 96. Удельная теплоемкость твердого тела.

Все атомы кристаллической решетки твердого тела похожи друг на друга и каждый из них может колебаться. Равномерное распределение предполагает равную долю кинетической и потенциальной энергии на каждое из направлений колебаний атома в трехмерном пространстве. Отсюда мы получаем, что произведение удельной теплоемкости на атомный вес должно быть постоянной величиной, приблизительно равной 6. Однако экспериментальные измерения, как видно из точек на фиг. 97, при низких температурах дают гораздо меньшую величину.

величину произведения *удельной теплоемкости на атомный вес*. В этом заключается правило Дюлонга и Пти, открытое около века назад и решившее споры о химических атомных весах. Оно удивительно хорошо подходит повсюду, за исключением низких температур, где дают себя знать квантовые эффекты.

При достаточно низких температурах квантовые ограничения сводят удельную теплоемкость к нулю. Кривую изменений теплоемкости можно получить



Фиг. 97. Квантовая теория удельной теплоемкости.

Наложение квантовых ограничений на равномерное распределение энергии в случае колебаний атомов приводит к теоретическому предсказанию, изображенному сплошной линией.

комбинацией квантовых правил с кинетической теорией. «Достаточно низкие температуры» изменяются при переходе от одного твердого тела к другому и зависят от естественных частот колебаний атомов в кристалле. Поэтому, чтобы сравнить экспериментальные данные с теорией, мы для каждого твердого тела откладываем на графике свою шкалу температур. После этого все измерения ложатся на одну теоретическую кривую (фиг. 97).

Таковы замечательные результаты изучения удельной теплоемкости столь скучного на первый взгляд предмета. Уже первые предсказания кинетической теории согласовывались с фактами, убеждая тем самым в правильности теории. Затем появились исключения и потребовали новой, квантовой теории, которая в свою очередь очень хорошо согласовывалась с экспериментом и объяснила целый ряд кажущихся противоречий.

Каков диаметр молекулы?

Сколь велики молекулы воздуха? Это бессмысленный вопрос, если мы не скажем, сколь сильно мы предполагаем давить на мо-

лекулу, измеряя ее. Портной *может* уменьшить размер талии человека почти до нуля, перерезав ее при снятии мерки жесткой стальной проволокой. Мы *можем* уменьшить «диаметр» молекулы до нуля, измеряя его с помощью электронов, ускоренных миллиардами вольт. Здесь мы имеем в виду диаметр при «обычных соударениях», т. е. расстояние между центрами сталкивающихся молекул при наибольшем сближении или при плотной упаковке в жидкости или твердом теле. В наглядной модели атомной структуры — это размер внешнего электронного облака атомов в молекуле.

Грубую оценку размера молекул можно получить из измерения толщины масляных пленок (см. задачи 5, 6, 7 в гл. 6¹⁾). Это дает для молекулярной цепи из 19 атомов углерода длину $24 \cdot 10^{-10}$ м или 24 Å (ангстрема). Тогда получаем, что «диаметр» каждого атома углерода в тесной цепочке равен 1—2 Å. Молекулы кислорода и азота содержат по два атома (по-видимому, больших по размерам, чем атом углерода), так что мы можем поместить эту гантель в «шарик» диаметром 3—4 Å²⁾. Тогда их «поперечное сечение» относительно рассеяния будет около $\pi (3,5 \cdot 10^{-10}/2)^2$ м².

Для получения более надежных оценок мы не будем пользоваться результатами измерения пленок или броуновского движения. Мы подойдем по-иному: рассмотрим измерения с жидким и обычным воздухом и бурными парами брома.

Размер молекул воздуха; непосредственные оценки

Проведем два эксперимента: 1) найдем изменение объема при переходе жидкого воздуха в газообразный и 2) рассмотрим диффузию брома в воздухе, измеряя скорость его распространения.

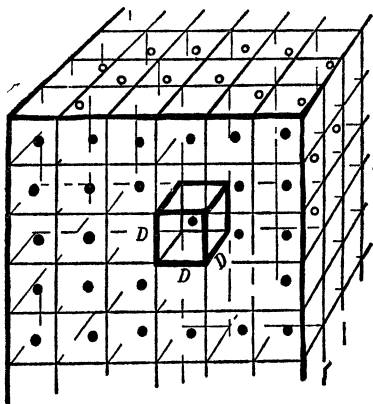
Первое измерение дает нам возможность сравнить удаленность молекул друг от друга в газе и в жидкости. Второе — даст оценку «среднего свободного пробега» молекул газа — среднего пути между двумя последовательными соударениями. Оба результата связаны с «площадью поперечного сечения» молекул газа или их диаметром. Комбинируя их, мы сможем получить хорошую, хотя и грубую, оценку диаметра молекул, а отсюда — вычислить массу молекул и число молекул в заданном объеме.

«В отчаянии» физику удастся получить приближенное значение размера молекулы «по порядку величины», но попытка установить размер точнее затуманивает вопрос множеством сложнейших деталей. Как в экспериментальных измерениях, так и в теоретических рассуждениях мы будем «сглаживать углы»,

¹⁾ Гл. 6 («Поверхностное натяжение: капля и молекулы») входит в т. 1 настоящего издания.

²⁾ Учитывая возможные сомнения в определении и в измерениях, разумно, пожалуй, считать *несколько* числом. Например, «диаметр равен нескольким Å».

упрощать, делать приближения, строить догадки, словом, поступать так, как делают настоящие ученые, когда они впервые попадают в незнакомую им область ¹⁾. Поэтому наши результаты могут быть лишь приближительными. Тем не менее в таком вопросе, как атомные размеры, очень ценны даже неточные измерения, дающие порядок величины размеров и числа атомов и демонстрирующие возможность подобных измерений в микромире.



1) *Изменение объема. Расстояние между молекулами воздуха.* На сколько в среднем молекулы воздуха удалены от своих соседей? Чтобы поставить вопрос в более определенной форме, предположим, что мы на мгновение как-то разместили молекулы воздуха и навели среди них порядок, скажем посадили каждую молекулу в отдельный кубик с ребром длиной D , причем расположение этих

Фиг. 98. Расстояние между молекулами в газе.

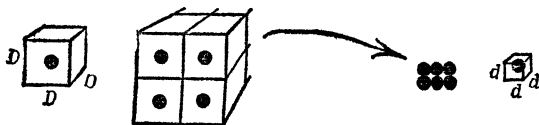
кубиков регулярно. Тогда можно утверждать, что D — это «средняя удаленность» молекул воздуха.

¹⁾ В последующих рассмотрении мы будем считать молекулы воздуха или брома твердыми шариками определенного диаметра d , хотя «правдоподобнее» было бы представлять их продолговатыми и пушистыми. Мы сделаем еще допущение, что молекулы жидкости упакованы таким образом, что каждая занимает кубик объемом d^3 . Определяя случайные блуждания, мы считаем длину всех шагов, L , в среднем одинаковой, хотя и знаем, что пробег молекул от раза к разу сильно изменяется в окрестности среднего значения L . Окончательные значения представляют собой корень квадратный из средней квадратичной величины. Арифметическое среднее было бы приблизительно на 20% меньше.

Оценивая «расстояние полупобурения» для брома, мы имеем дело со случайным блужданием в одном измерении вместо трех — только вверх. Более того, мы не знаем, какого типа среднее воспринимает наше зрение. Кроме того, точность в определении расстояния «полупобурения» будет невысока из-за того, что не учитывается разница размеров молекул брома и воздуха и в нашей упрощенной статистике отсутствуют точные множители, наподобие $\sqrt{\pi}$ или $\sqrt{2}$.

Жидкий бром более чем в 3 раза плотнее жидкого воздуха, а молекулы брома в $5 \frac{1}{2}$ раз массивнее молекул воздуха. Отсюда ясно, что диаметр молекул брома в 1,2 раза больше молекул воздуха. Эффективный поперечник при соударении молекулы брома и воздуха будет тогда в 1,1 раза больше, чем для чистого воздуха, а площадь поперечного сечения — в $(1,1)^2$, или 1,2 раза. Но здесь мы тоже игнорируем разницу в 20%.

Мы считаем, что в жидком воздухе молекул столько, что они «касаются» друг друга, причем расстояние между центрами равно среднему диаметру молекул d . Жидкости плотны и текучи, они почти несжимаемы, и их молекулы должны быть тесно прижаты друг к другу; молекулы жидкости не «закреплены» жестко, как в «узлах» кристаллической решетки твердого тела, но и не разлетаются, как молекулы газа. Мы предполагаем, что молекулы жидкого воздуха размещаются в кубических ячейках, каждая с ребром d и объемом d^3 . (Это не самая плотная из возможных упаковок, она еще оставляет место для текучести.) Затем, когда жидкость превращается в газ, d превращается в D , а объем каждой ячейки возрастает от d^3 до D^3 . Это изменение объема должно



Фиг. 99. От газа к жидкости.

быть одинаковым как для одной молекулы, так и для всей массы воздуха. Но составляет труда измерить его. Наполним небольшую известного объема колбочку жидким воздухом. Затем быстро прикрепим к ее горлышку гибкую пластмассовую трубку. Другой конец трубки погрузим под воду, над которой помещен большой перевернутый вверх дном сосуд. Жидкий воздух в колбочке закипает, превращается в газообразный, его пузыри поднимаются вверх, собираются в сосуде, и измеряется объем.

Пример.

20 см³ жидкого воздуха превращаются в 15 000 см³ обычного воздуха при комнатной температуре и атмосферном давлении. Следовательно,

$$\frac{D^3}{d^3} = \frac{15\,000}{20} = 750, \quad \text{а} \quad \frac{D}{d} = \sqrt[3]{750} \approx 9 \text{ (с точностью до } 1\%).$$

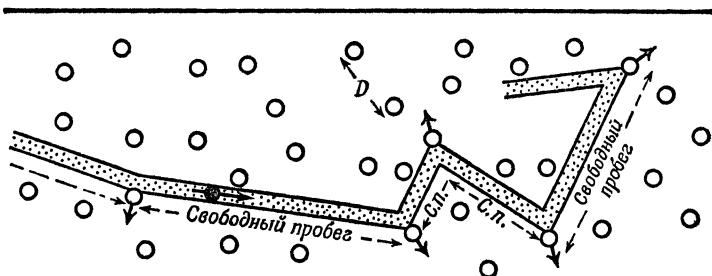
Среднее расстояние между молекулами воздуха равно стороне кубика, содержащего одну молекулу, т.е. $D \approx 9d$. При атмосферном давлении молекулы воздуха удалены друг от друга на 9 или 10 диаметров. Это дает представление о количестве пустого места в газе и указывает на то, что наличие размеров молекул не очень мешает нашим простым теоретическим предсказаниям.

Задача 9

На сколько диаметров удалены друг от друга молекулы в цилиндре с воздухом, сжатым до 125 атм? (У к а з а н и е. При расстоянии $10/125$ диаметра молекулы еще не напоминают сельдей в бочке.)

2) Средняя длина свободного пробега. Сколько в среднем пролетает молекула между последовательными соударениями? Это расстояние, называемое средней длиной свободного пробега, не совпадает с расстоянием D . Если бы молекулы были точечными, они пролетали бы друг мимо друга, совершенно не сталкиваясь. Чем «толще» молекулы, тем большую мишень подставляют они под удар движущимся соседям, тем чаще происходит соударения.

Длину свободного пробега можно оценить, используя в качестве «метки» видимые пары брома. Повторим демонстрацию диффузии брома в сосуде с воздухом (см. фиг. 10, стр. 351), отмечая скорость продвижения бурых паров. Пустим секундомер в момент, когда жидкий бром выпускался на дно высокой трубки. Спустя некоторое время, скажем 500 сек, измерим *среднее* расстояние, на которое пары брома поднялись вверх. Для этого нужно решить, где смесь



Фиг. 100. Средний свободный пробег молекулы газа.

При атмосферном давлении средний свободный пробег гораздо больше расстояния D . (Заштрихованная трубка показывает объем, заполняемый одной молекулой, движущейся среди остальных.)

брома и воздуха в трубке выглядит «полубурой», т. е. вдвое более светлой, чем «совершенно бурый» газ непосредственно над жидким бромом, и измерить высоту этого места над поверхностью жидкости. Это, очевидно, приближенная и субъективная оценка, но если каждый наблюдающий опыт в аудитории делает свою оценку, отклонение вряд ли превысит 10% от средней высоты.

Каждая молекула брома достигает своего конечного положения в результате огромного числа шагов «случайных блужданий»¹⁾. Чтобы воспользоваться оценкой высоты «полубурения», нужна помощь статистики. Нам необходимо выражение для среднего продвижения при большом числе последовательных шагов длиной L в хаотических направлениях. Эта проблема называется задачей о «случайных блужданиях» (ее называют еще задачей о «пути пьяницы», the drunkard's walk). Согласно статистическим исследованиям, это число равно $\sqrt{N}$, а ниже показано, как получить его в случае двух измерений. Все это справедливо и для трех измерений и полезно в некоторых физических задачах, таких, как выход фотонов из недр Солнца, диффузия нейтронов в «замедлителе» реактора, звучание поющего хора, а следовательно, и преимущество «согласованных» (когерентных) световых волн лазеров по сравнению со светом от горячего пламени или газа, где атомы «поют как нестройный хор».

¹⁾ Зарисовка случайного блуждания из нескольких сот шагов приведена на фиг. 89 (стр. 530). За выбранное нами время молекула брома претерпевает огромное число соударений (сотни миллиардов), а мы наблюдаем огромное множество таких молекул. Так что N (число соударений) невообразимо велико и усреднение происходит по огромному числу случайных блужданий.

Представьте себе случайное блуждание молекулы брома, мечущейся от столкновения к столкновению в толпе молекул воздуха. Мы считаем, что все ее прыжки имеют одинаковую длину, равную среднему свободному пробегу L . Если за время t каждая из молекул делает N шагов, то среднее перемещение равно $\sqrt{N} \cdot L$. Число шагов подсчитаем так: полный (спрямленный) путь за время t равен vt , где v — скорость молекул брома. Число шагов на таком пути $N = vt/L$. Следовательно, среднее перемещение S равно

$$S = \sqrt{N} \cdot L = \sqrt{\frac{vt}{L}} \cdot L = \sqrt{v \cdot t \cdot L}$$

Оценка расстояния «полупобурения» дает S , так что, зная v , можно вычислить L . Как и для других газов, v получается из измерения плотности и давления паров брома. Для тяжелых паров брома при комнатной температуре ¹⁾ это дает: $v = 210$ м/сек.

Пример

Предположим, что группа наблюдателей определила высоту «полупобурения» 9 см над поверхностью брома за 500 сек. Спрямоленный путь молекулы брома за это же время составил $(210 \text{ м/сек}) \cdot (500 \text{ сек})$, а число шагов на этом пути равно $(210 \cdot 500) / (\text{Средний свободный пробег } L)$. Тогда среднее перемещение S определится так:

$$S = \sqrt{210 \cdot 500 / L \cdot L} = \sqrt{210 \cdot 500 \cdot L}$$

т. е.

$$\frac{9}{100} \text{ м} = \sqrt{210 \cdot 500 \cdot L}$$

Следовательно,

$$L \approx \frac{(81/10^4)}{(210 \cdot 500)} \approx 770 \cdot 10^{-10} \text{ м, или } 770 \text{ Å.}$$

Округленно средний свободный пробег молекул брома в воздухе можно считать равным 800 Å, и, по-видимому, не будет серьезной ошибкой считать таким же свободный пробег молекул воздуха в воздухе. (Если бы измерения дали в среднем 10 см вместо 9 см, то величина среднего свободного пробега составила бы 1000 Å; это подтверждает приближенный характер нашего результата.)

Таким образом, оценки для обычного воздуха показывают, что: 1) молекулы удалены друг от друга примерно на 9 диаметров; 2) средняя длина свободного пробега составляет примерно 800 Å ($800 \cdot 10^{-10} \text{ м}$).

¹⁾ Доверяя Авогадро, мы из плотности и давления получаем, что молекула брома в 5,5 раза тяжелее молекулы воздуха; таким образом, мы приходим к химической формуле Br_2 с «молекулярным весом» 160. А простая кинетическая теория утверждает, что средняя скорость молекул будет меньше в $\sqrt{5,5}$ раз.

Средний свободный пробег и давление

Удалим теперь половину молекул из сосуда с газом. Этим мы вдвое уменьшим вероятность попадания и удвоим, таким образом, средний свободный пробег. В общем случае средний свободный пробег должен изменяться обратно пропорционально числу молекул в единице объема, или обратно пропорционально давлению. При высоком вакууме в одну миллиардную атмосферы средний свободный пробег будет в миллиард раз больше, т. е. $10^9 \cdot 800 \cdot 10^{-10}$ м, или 80 мк. Это значит, что в радиолампе молекула остаточного газа барабанил по стенкам, а другие молекулы газа редко попадают на ее пути.

Диаметр молекулы. Соотношение $\pi d^2 L = D^3$

Между средним свободным пробегом L и диаметром d существует однозначная связь: чем больше d , тем больше площадь мишени при столкновении и тем меньше длина свободного пробега. Можно показать, что $\pi d^2 L$ — объему, который в среднем приходится на одну молекулу в газе, т. е. D^3 . Геометрическое доказательство изложено ниже. Затем мы воспользуемся этим результатом для вычисления диаметра d из L и отношения объемов D^3/d^3 .

Вычисление случайных блужданий («путь пьяницы»)

Молекулы брома мечутся между молекулами воздуха, получая удар за ударом и меняя направление после каждого из них. Насколько при этом им удастся в среднем продвинуться вперед?

Образец подобного движения можно наблюдать на примере пьяного человека, возвращающегося туманной ночью с вечеринки. Выпустив из объятий фонарный столб, он делает один шаг, затем забывает о нем и делает второй, но уже в другом направлении, забывает и о нем и делает третий шаг... и так далее — N шагов в совершенно произвольных направлениях. На какое расстояние он отдалится от спасительного фонарного столба? Он может вернуться опять к столбу или оказаться очень близко от него. Он может отойти от столба на N шагов (в том редком случае, когда все шаги устремлены в одном направлении), но это маловероятно. Его перемещение по прямой лежит между 0 и N шагами. Мы же хотим найти среднюю величину перемещения, усредненную по мно-

жеству таких продвижений, состоящих из N шагов.

Пусть человек вновь и вновь повторяет свою «прогулку» сначала. После каждой прогулки мы будем измерять его перемещение S . Усредним S по этим прогулкам. Для удобства будем искать среднее значение S^2 , а затем извлечем квадратный корень, получив среднее квадратичное значение. Покажем, что это среднее должно приближаться к $\sqrt{N}$ шагов. (Например, если за основу берем 100 шагов, то ожидаем, что человек уйдет только на 10 шагов от начального места.) Вот доказательство в двумерном случае (трехмерный случай рассматривается так же).

Нарисуем несколько первых шагов хаотического движения. Пусть длина каждого шага равна L , а всего имеется N шагов. Воспользовавшись координатами x и y , разложим первый шаг на компоненты x_1 и y_1 , второй шаг на компоненты x_2 и y_2 и т. д. Для первого шага $x_1^2 + y_1^2 = L^2$, аналогично и для других шагов. Ком-

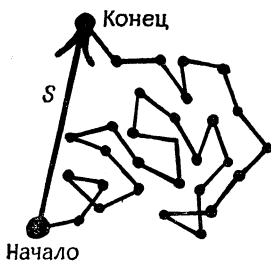
При столкновении двух молекул расстояние между их центрами равно *радиусу* одной + *радиус* второй молекул, т. е. *диаметру* d . Для упрощения будем считать, что радиус одной из сталкивающихся молекул равен d , а вторая молекула — просто точка (фиг. 101). Расстояние между их центрами при соударении по-прежнему будет d . Представим теперь, что мы стреляем *точечной* молекулой по системе из ячеек с ребром D , каждая из которых содержит по одной молекуле-мишени *радиусом* d (фиг. 102). Летящая молекула проходит первый ряд ячеек, но, вероятнее всего, не попадает в цель, которая находится где-то внутри ячейки.

попенты x и y перемещения S будут соответственно равны

$$(x_1 + x_2 + \dots + x_N)$$

и

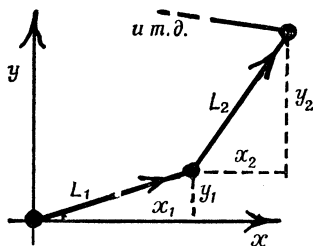
$$(y_1 + y_2 + \dots + y_N),$$



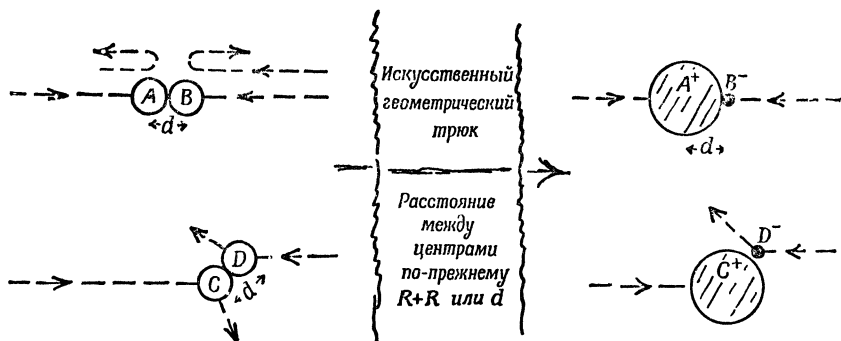
$$\begin{aligned} S^2 &= (x_1 + x_2 + \dots + x_N)^2 + \\ &+ (y_1 + y_2 + \dots + y_N)^2 = \\ &= x_1^2 + x_2^2 + \dots + 2x_1x_2 + 2x_1x_3 + \\ &+ \dots + y_1^2 + y_2^2 + \dots + 2y_1y_2 + \\ &+ 2y_1y_3 + \dots = \\ &= L^2 + L^2 + \dots \text{ нуль} = NL^2. \end{aligned}$$

«Смешанные слагаемые», наподобие $2x_1x_2$, при усреднении по многим блужданиям дают нуль, ибо

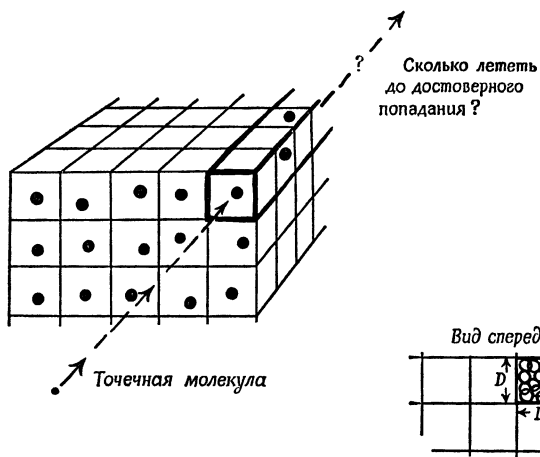
эти слагаемые могут одинаково часто быть как положительными, так и отрицательными и иметь величину от 0 до $2L^2$. То же справедливо и для «смешанных слагаемых» с y . Поэтому среднее значение $S = \sqrt{N \cdot L^2}$.



Доказательство станет нагляднее, если применит тригонометрию и разложить каждый шаг на горизонтальную и вертикальную компоненты: $L \cos \theta$ и $L \sin \theta$. Тогда пара смешанных слагаемых, наподобие $2L^2 \cos \theta_1 \cos \theta_2$ и $2L^2 \sin \theta_1 \sin \theta_2$, складывается в $2L^2 \cos (\theta_1 - \theta_2)$, а косинус одинаково часто бывает как положительным, так и отрицательным, давая в среднем нуль.



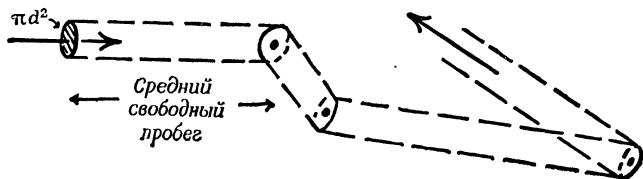
Фиг. 101. Упрощенная геометрия свободного пробега.



Фиг. 102. Средний свободный пробег.

Точечная молекула пронизывает ячейки. Сколько должна она пролететь ячеек до соударения? Молекуле, нацеленной на переднюю грань площадью D^2 , должно казаться, будто молекулы задних ячеек мишени заполняют своими кружочками площадью πD^2 всю грань.

Другой способ рассуждений. Вместо «раздувания» молекулы-мишени можно выстрелить «раздутой» молекулой, сжав остальные молекулы в точки. Тогда площадь поперечного сечения летящей молекулы равна πd^2 . Во время полета она заполняет трубку с таким поперечным сечением; при каждом столкновении эта трубка изгибается (фиг. 103). Когда в такую «трубку» попадает молекула-мишень, происходит столкновение, а не попавшие в трубку молекулы остаются «за бортом». Между двумя последовательными соуда-



Фиг. 103.

рениями молекула пролетает средний свободный пробег, так что заполненный объем равен

(ПЛОЩАДЬ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ) · (СРЕДНИЙ СВОБОДНЫЙ ПРОБЕГ),
или $\pi d^2 L$.

Но заполняя этот объем, она *столкивается только с одной молекулой*, так что этот объем равен также D^3 , т. е. размеру ячейки, занимаемой одной молекулой газа. Следовательно, $\pi d^2 L = D^3$, или $L = D^3 / \pi d^2$, как и выше.

Еще более простой метод. За счет более смелых предположений можно прийти к оценке d даже без всякой геометрии и «труб». Будем рассуждать так. Поместим некое количество обычного воздуха в высокий цилиндр. Нажмем на поршень и сожмем воздух в 750 раз, чтобы молекулы сгрудились столь же тесно, как в жидком воздухе. (Если хотите, охлаждайте воздух до тех пор, пока он не станет жидким.) Сгрудившиеся молекулы служат лучшей мишенью, так как средний свободный пробег станет в 750 раз меньше. Попытаемся теперь *догадаться, каков будет средний свободный пробег* молекул в воздухе, сжатом до плотности жидкости. Сообразите-ка, сколько ячеек должна пролететь одна молекула, чтобы удариться о другую, учитывая при этом расстояние не от центра до центра, а *от поверхности до поверхности*. Это трудная задача.

Попытайтесь создать собственный метод и вот вам несколько наводящих соображений. Если бы среднее расстояние между соседними молекулами составляло один диаметр, то они сталкивались бы довольно часто, но все же свободного места оставалось бы еще столько, что они вели бы себя как газ, а не как жидкость. (Вспомните, что жидкости почти несжимаемы; давление в 20 000 атм сжимает воду лишь на 25%.) Если же молекулы сгрудились настолько, что каждая проходит всего $1/10$ диаметра до столкновения с другой, то они практически оказались бы связанными, как в твердом теле. Изобразите молекулы кружками на бумаге или одинаковыми монетами на столе, посмотрите, какой средний свободный пробег соответствует расстояниям от $0,1d$ до d .

Допустим, вы выбрали $\frac{3}{10} d$, тогда можно сказать:

$$\text{Средний свободный пробег в тесноте } \frac{L}{750} = \frac{3}{10} d,$$

т. е.

$$\frac{800 \cdot 10^{-10}}{750} = \frac{3}{10} d,$$

следовательно,

$$d = 3,6 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 3,6 \text{ \AA}.$$

(Нетрудно получить правильный ответ, выбрав для среднего свободного пробега нужную долю d , но это нечестно. Честнее установить верхний предел или оценить пробег из представления о строении молекул, причем не следует забывать, что это лишь приближенная оценка.)

Итак продолжаем.

Сколько же слоев ячеек должна пройти молекула, чтобы можно было гарантировать одно соударение? Об этом говорит нам средний свободный пробег. Площадь лицевой грани ячейки равна D^2 , но молекула-мишень «подставляет» под обстрел только «яблочко» площадью πd^2 . Предположим, что до соударения молекула должна пролететь X ячеек. Она видит перед собой X «яблочек», которые, будучи рассыпаны совершенно случайно, не перекрывая друг друга, должны заполнять площадь «входного окна» D^2 , т. е. $X \cdot \pi d^2 = D^2$, или $X = D^2 / \pi d^2$. Полный путь через эти ячейки равен $X \cdot D$, но, с другой стороны, он равен среднему расстоянию, пройденному между двумя соударениями, т. е. среднему свободному пробегу L :

$$\text{СРЕДНИЙ СВОБОДНЫЙ ПРОБЕГ } L = X \cdot D = \frac{D^2}{\pi d^2} \cdot D = \frac{D^3}{\pi d^2},$$

или

$$L \pi d^2 = D^3 = 750 d^3, \\ d = \frac{L \pi}{750} = 800 \text{ \AA} \cdot \frac{3,14}{750}.$$

Подставляя нашу оценку для L , получаем

$$d \approx 3,4 \text{ \AA}, \text{ или } 3,4 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Наш частный пример дал величину $d = 3,4 \text{ \AA}$. Подобные соображения обычно дают значения между 2 и 7 $\text{\AA}$. Мы уже говорили, что это «спмволническое» измерение, проверка принципа, которая показывает способ извлечения характеристик микромира (масштаба размеров атома) из макроскопических (масштаба человека) измерений и теории.

Читателю следовало бы самому проделать такой опыт и составить свою оценку. Точные измерения и совершенная теория дают величину 3,72 $\text{\AA}$. Все же такая оценка, основанная на представлении о том, что молекула есть твердый шар, кажется искусственной. Однако она подтверждается более надежными оценками для массы и размеров молекул, основанными на методах, использующих значение заряда электрона, определенное в опытах Милликена. Мы будем считать отныне размер молекулы равным 3,72 $\text{\AA}$, но записывать будем $3\frac{3}{4} \text{ \AA}$, отразив таким образом наши сомнения.

Расстояние между молекулами в воздухе будет тогда около $9 \cdot 3\frac{3}{4}$, или $\sim 35 \text{ \AA}$, так что для атмосферного воздуха получаются такие оценки:

<i>Размер</i> (наибольшее сближение при столкновении)	$3\frac{3}{4} \text{ \AA}$
<i>Удаленность</i> (среднее расстояние между соседями)	$35 \text{ \AA}$
<i>Средний свободный пробег</i> (между соударениями)	$600\text{—}1000 \text{ \AA}$
<i>Скорость</i> (средняя)	500 м/сек
Более полное статистическое исследование приводит к среднему свободному пробегу $650 \text{ \AA}$.	

Задача 10

Исходя из данных приведенной выше таблицы, вычислите количество соударений в секунду молекулы воздуха при атмосферном давлении.

Число молекул. Число Авогадро

Теперь можно вычислить число молекул воздуха в данном объеме, скажем в небольшой комнате $3 \text{ м} \times 2 \text{ м} \times 4 \text{ м}$, т. е. объемом 24 м^3 . Каждой молекуле воздуха мы приписываем объем D^3 , или $750 d^3$. Тогда число молекул будет

$$\frac{24 \text{ м}^3}{750 (3\frac{3}{4} \cdot 10^{-10} \text{ м})^3},$$

или около $6 \cdot 10^{26}$.

В такой небольшой комнате при комнатной температуре и атмосферном давлении заключено 600 000 000 000 000 000 000 000 000 молекул воздуха. Как утверждал Авогадро (см. задачу 6, стр. 531), это число одинаково для любого газа при том же объеме; в честь ученого мы называем его *числом Авогадро*.

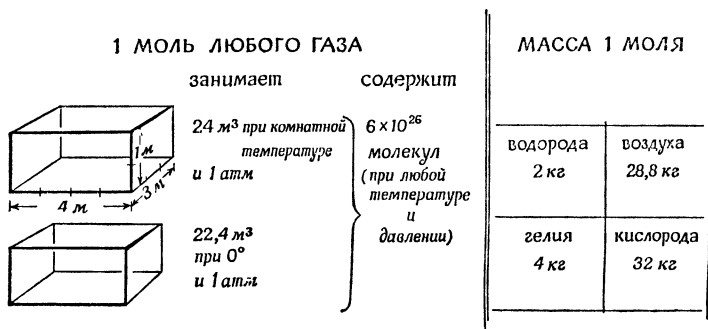
Мы выбрали этот объем ¹⁾ потому, что число килограммов воздуха и других газов в таком объеме оказываются очень полезной величиной: 2 кг водорода, 4 кг гелия, 32 кг кислорода, 44 кг CO_2 . Ведь это же как раз относительные массы молекул по химической шкале (масса атома водорода = 1). Каждую такую массу в килограммах мы называем *киломолем* ²⁾ (фиг. 104). Тогда один

¹⁾ $22,4 \text{ м}^3$ при атмосферном давлении и 0° C расширяются до 24 м^3 при комнатной температуре.

²⁾ Киломоль в 1000 раз больше обычного химического моля, в котором имеют дело с граммами. Поэтому наше *число Авогадро* в 1000 раз больше числа молекул в моле.

киломоль любого вещества содержит $6 \cdot 10^{26}$ молекул. (Здесь для краткости будем называть его молем.)

Даже когда воздух откачан очень хорошим насосом и получен «высокий вакуум», т. е. давление будет составлять, например,



Фиг. 104. Киломоль.

миллиардную долю атмосферы, то в комнате еще останется 600 000 000 000 000 000 молекул ($6 \cdot 10^{17}$).

Масса молекулы

Теперь можно вычислить массу отдельной молекулы. Наша комната объемом 24 м³ содержит $6 \cdot 10^{26}$ молекул, масса которых всех вместе составляет 28,8 кг. (Это определяется взвешиванием и измерением объема воздуха.) Таким образом,

$$\text{Масса молекулы воздуха} = \frac{28,8}{6 \cdot 10^{26}} = 4,8 \cdot 10^{-26} \text{ кг.}$$

Если вместо воздуха взять водород, то масса $6 \cdot 10^{26}$ молекул будет равна 2 кг, а

$$\text{Масса молекулы водорода} = \frac{2 \text{ кг}}{6 \cdot 10^{26}} = 3,33 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Зная из химических соображений ¹⁾, что молекула водорода состоит из двух атомов Н₂, мы заключаем, что

$$\text{Масса атома водорода} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

¹⁾ Гл. 35 («Химия и электролиз») входит в т. 3 настоящего издания.

Это масса «протона», которая будет очень важна для нас при подсчете энергии (см. гл. 43¹⁾).

Молекулы и температура

По универсальной шкале газового термометра абсолютная температура измеряется произведением $P \cdot V$, так что, согласно определению, $PV = RT$, где R — постоянная величина. Если мы возьмем один моль газа, то независимо от его сорта R будет одной и той же.

Кинетическая теория дает

$$PV = \frac{1}{3} N m \bar{v}^2 = \frac{2}{3} N \left(\frac{1}{2} m \bar{v}^2 \right) = \frac{2}{3} E_{\text{кин}}.$$

Следовательно,

$$\text{Кинетическая энергия молекул} = \frac{3}{2} PV = \frac{3}{2} RT,$$

поэтому

Средняя кинетическая энергия одной молекулы =

$$= \frac{3}{2} \frac{RT}{N} = \frac{3}{2} \frac{R \text{ для одного моля газа}}{\text{Число Авогадро для одного моля}} \cdot T = \frac{3}{2} kT,$$

где k — газовая постоянная, отнесенная к одной молекуле.

Равномерное распределение энергии привело нас к одинаковой кинетической энергии для молекул любого сорта при одинаковой температуре T , так что k — универсальная постоянная, одинаковая для молекул любого сорта²⁾.

Теперь можно придать температуре ясный и простой смысл. *Абсолютная температура характеризует среднюю кинетическую энергию любой молекулы.* Это просто умноженная на $2/(3k)$ средняя кинетическая энергия. Мы считаем, что молекулы газа делятся своей кинетической энергией с молекулами стенок контейнера или шарика термометра по закону, похожему на закон равномерного распределения энергии.

Разделение изотопов урана

Чтобы выделить U^{235} диффузией UF_6 , нам нужна пористая перегородка, которая отличала бы быстрые молекулы от медленных. Большие отверстия в перегородке не дадут никакого разде-

¹⁾ Гл. 43 («Физика атомного ядра») входит в т. 3 настоящего издания.

²⁾ Ей присвоено наименование *постоянной Больцмана*. — *Прим. перев.*

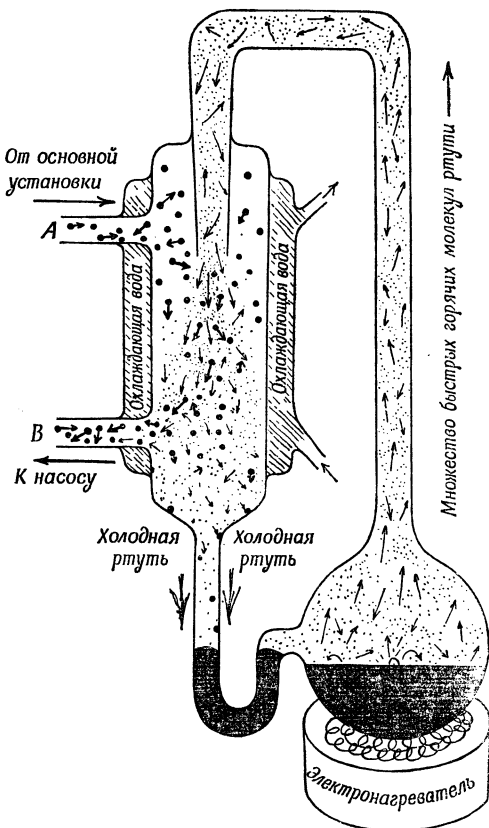
ления. Молекулы газа пройдут через них как обычный поток, сталкиваясь друг с другом и приобретая из-за разности давлений дополнительный импульс. Смесь молекул будет проходить через перегородку, не меняясь. Маленькие поры в доли среднего свободного пробега позволяют молекулам проявить свою индивидуальность. Если поры длинные, то, прорываясь сквозь них, каждая молекула множество раз ударяется о стенки и поэтому быстрая молекула получает преимущество по сравнению с медленной. Поры перегородки должны быть гораздо меньше $1000 \text{ \AA}$, но больше самих диффундирующих молекул, скажем $5\text{--}6 \text{ \AA}$ для UF_6 . Диаметр их должен быть между 100 и $10 \text{ \AA}$ — требование необычное для технологов и изобретателей. Такие перегородки можно приготовить, например, в виде тонких пористых пластинок прессовкой металлического порошка. Они используются в огромном масштабе, разделяя килограммами U^{235} в системе каскада из нескольких тысяч стадий с автоматической перекачкой и системой контроля за ядовитыми парами UF_6 . Изменение содержания изотопа напоминает рост суммы вклада в банке по сложным процентам в течение многих лет. Для разделения нужно множество стадий с перекачиванием молекул на вход предыдущей стадии (см. фиг. 18, стр. 360).

Вакуумные насосы и барометры

При проведении исследований по электронике и атомной физике в большинстве установок бывает необходимо создать хороший вакуум. Хороший вакуум нужен и в промышленных масштабах для изготовления радиоламп и рентгеновских трубок. Как сделать подходящие насосы и контролировать остаточное давление в миллионные или даже миллиардные доли атмосферы?

Механические насосы с поршнем в виде вращающегося в масле затвора могут с легкостью понизить давление от одной атмосферы до $1/10$, $1/100$ и даже $1/10\,000$ доли атмосферы. Для создания еще большего вакуума применяют более быстрые «поршни» — *отдельные движущиеся молекулы*. Поток «горячих» молекул паров ртути несется вдоль цилиндра, стенки которого охлаждаются холодной водой и замедляют молекулы при ударах до малых скоростей. Таким образом получается много быстрых молекул ртути в верхней части и медленных — в нижней. Попавшая сюда молекула воздуха чаще и сильнее толкается *вниз* молекулами горячей ртути, чем *сверху* холодной; сверху сыплются сильные удары, снизу только шлепки; насос так и работает: стук... шлеп... стук... шлеп... стук...

шлеп...шлеп... И «бродяга» в среднем приобретает импульс вниз. Попадая через отверстие *A* (фиг. 105) в основной объем, молекулы воздуха проталкиваются к отверстию *B*, где удаляются механическим насосом. Эта система как будто не очень много обещает, однако молекулы ртути при охлаждении так меняют свою скорость, что прибор оказывается очень эффективным. Вместе с хорошим механическим насосом такой *диффузионный насос* способен понизить давление до миллиардных долей атмосферного. В промышленных диффузионных насосах стекло заменяется металлом, а ртуть — кипящим маслом. Радиолампы и другие приборы, в которых нужен высокий вакуум, при откачке прогреваются, чтобы выгнать прилипшие к стенкам газы. Для окончательной очистки внутри лампы производится электрический взрыв маленького кусочка металла (геттер), который, образуя на стенках тонкое

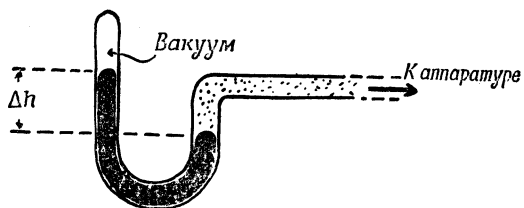


Фиг. 105. Ртутный диффузионный насос.

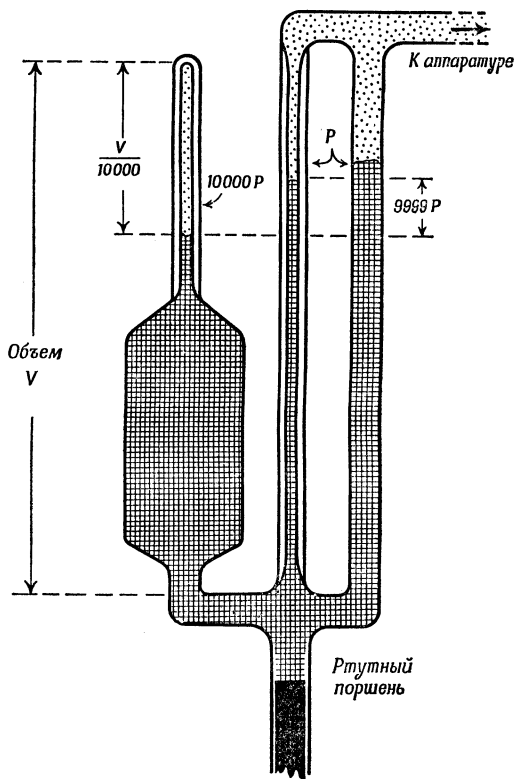
«Молекулярный» насос.

зеркало, запирает тем самым оставшиеся там молекулы воздуха. Для создания еще большего вакуума молекулы остаточного газа ионизируются путем бомбардировки электронами, а затем крепко «вбиваются» электрическим полем в стенки и остаются там.

Как можно измерить очень низкое давление в «хорошем» вакууме? Для давления до $1/_{100}$ атм достаточно маленькой



Фиг. 106. Манометр для измерения вакуума.



Фиг. 107. Манометр Мак-Леода.

Образец сильно разреженного газа сжимается в отношении, скажем, $1 : 10\,000$. Затем измеряется его давление, которое стало теперь в $10\,000$ раз больше. Заштрихованная область заполняется ртутью для «запирания» и сжатия образца газа.

U-образной трубки со ртутью, с вакуумом, с одной стороны, и измеряемым давлением — с другой (фиг. 106).

Для давления $1/_{1000\ 000}$ атм и меньше разница уровней слишком мала, чтобы заметить ее и не спутать с капиллярными эффектами. Для измерения высокого вакуума сейчас используются сложные ионизационные приборы, в которых из немногих оставшихся молекул выбиваются электроны и измеряется слабый ток образовавшихся ионов.

Для измерения обычного вакуума мы используем простой манометр Мак-Леода, придуманный талантливым шотландцем. В широкий цилиндр впускается большой объем остаточного газа, который сжимается ртутным поршнем, скажем, в отношении 10 000 : 1. Давление тогда должно возрасти в 10 000 раз. Это давление сжатого газа измеряется затем по разности уровней ртути. В манометре, изображенном на фиг. 107, газ из цилиндра диаметром 50 мм перегоняется в капилляр диаметром 1 мм, так что изменение сечения равно $50^2 : 1$. Длина же изменяется от 10 см в цилиндре до 2,5 см в капиллярной трубке, уменьшаясь в отношении 4 : 1. Для объема получается отношение $(2500) \cdot (4) : 1$, или 10 000 : 1. Возросшее давление определяется по разности уровней ¹⁾ ртути в капилляре со сжатым газом и в параллельной трубке, подсоединенной к основному объему.

Теория реальных газов

Теперь мы можем отшлифовать нашу теорию и превратить ее во всеобщий закон реальных газов. Молекулы упруги, свободны, малы..., но не бесконечно малы. Если сами они занимают некий объем, то пространство, доступное для движения, уже не будет совпадать с наблюдаемым объемом V , а несколько меньше $V - b$, где b — поправка, учитывающая размеры молекул ²⁾. Кроме того, молекулы не свободны от влияния друг на друга. При сближении они притягиваются; так, мы знаем, происходит в жидкостях. При больших сжатиях молекулы «сдерживают» друг друга, уменьшая давление на стенки сосуда. Правдоподобные рассуждения

¹⁾ Строго говоря, разность дает нам $(10\ 000\ P - P)$, или $(9999\ P)$, но было бы слишком смело считать эту величину отличной от $10\ 000\ P$.

²⁾ В задаче 14 гл. 25 (стр. 363) следовало предсказать влияние воображаемого увеличения размеров молекул. Это привело бы к укорочению длины свободного пробега и увеличению давления.

показывают, что наблюдаемое давление P не просто RT/V , а $RT/V - a/V^2$, где a — постоянная ¹⁾.

Закон $PV = RT$ превращается в

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT.$$

Это уточненный газовый закон, называемый законом Ван дер Ваальса. (Соответствующие графики приведены на фиг. 110.) Новая формула достаточно хорошо описывает поведение реальных газов, предсказывая отклонения от закона Бойля в обширной области давлений вплоть до тысяч атмосфер и даже ниже критической температуры. Она сводится к старой записи, когда V велико, например для воздуха при атмосферном давлении или ниже. (Хороший пример принципа соответствия Бора: новая теория должна сводиться к старой в пределе, когда новые условия оказываются несущественными.)

Это хорошая теория. Добавление реальных предположений приводит к более общим выводам. Мы можем сверить данные опыта с новым законом и найти для каждого газа величины a и b . Затем можно воспользоваться этим законом и привести показания газового термометра к идеальной газовой шкале. Величина b позволяет оценить диаметр молекул. А когда газ превращается в жидкость, поправка a/V^2 намного превышает обычное давление и возникает поверхностное натяжение, удерживающее жидкость в капле.

Разумное применение теории

Используя манометр Мак-Леода, мы доверяем закону Бойля. Но откуда же известно, что закон Бойля справедлив при очень низком давлении, вдали от той области, где его можно экспериментально проверить? Чтобы гарантировать это, нужно измерять P и V вплоть до этих давлений. Но как измерить P ? Ведь не ба-

¹⁾ a/V^2 — небольшая поправка, пропорциональная частоте соударений. Мы считаем, что непосредственно перед самым ударом о стенку взаимное притяжение может удержать медленные молекулы от удара. Оно заставляет их сталкиваться между собой или ... как бы «поболтать по телефону». Число телефонных разговоров в городе пропорционально (плотности населения)². Точно так же вероятность, а следовательно, и частота молекулярных соударений пропорциональна (плотности)², или $(1/V^2)$. Поэтому уменьшение измеряемого давления (вследствие взаимодействия) $\sim 1/V^2$. Таким образом, добавив к измеренному давлению P величину a/V^2 , мы получим эту формулу.

рометром же Мак-Леода! Для этого мы обращаемся к кинетической теории газов и спрашиваем, можно ли доверять закону Бойля? Обычно *экстраполировать* теорию очень рискованно, но здесь теория дает мудрый ответ: «Если и существует область, где можно пренебречь размером молекул и их притяжением и где должен быть справедлив простой закон, то где, как не при очень низких давлениях можно положиться на закон Бойля». Это необычный случай, когда теория сама гарантирует свою экстраполяцию с большой точностью.

Можно ли сжать газ до жидкости?

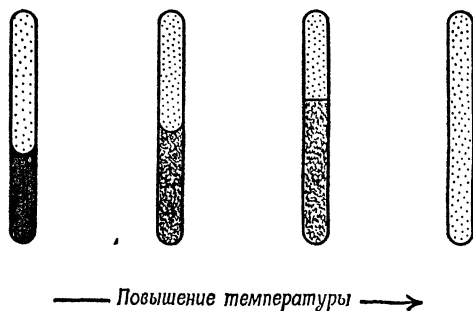
Как делают жидкий воздух? Не просто сжатием. Даже если мы сожмем газ так, что он будет столь же плотным, что и жидкость, он по-прежнему будет занимать весь сосуд. Кажется, что его молекулы неспособны собраться в жидкость. Однако если мы охладим газ ниже *критической температуры*, то при сжатии он сможет превратиться в жидкость. Если же его охладить, а для сжижения сжать недостаточно, он по-прежнему будет вести себя как газ, который называют *паром*. Пар можно превратить в жидкость простым сжатием, но, чтобы превратить в жидкость истинный газ, следует сперва охладить его ниже критической температуры и сжать (продолжая при конденсации отбирать тепло). При наличии достаточного места любая жидкость превращается в пар.

Таким образом, каждое вещество характеризуется определенной критической температурой, выше которой оно — несжижаемый газ, а ниже — либо пар, либо пар + жидкость, либо жидкость в зависимости от давления. Комнатная температура для большинства газов значительно выше их критической температуры, а для всех жидкостей, разумеется, ниже ее. Азот — это газ, водяной пар — это пар, ртуть — это жидкость, а свинец — это твердое тело. На Солнце все они были бы газами, на Нептуне — твердыми телами.

Критическая температура воздуха равна -140°C , гелия — всего лишь несколько градусов выше абсолютного нуля, воды — около $+365^{\circ}\text{C}$, углекислого газа 31°C . В обычные нежаркие дни огнетушитель, скажем, на $\frac{3}{4}$ заполнен жидким CO_2 , над которым находится пар ¹⁾. В очень жаркие дни граница жидкости исчезает

¹⁾ При атмосферном давлении CO_2 не может существовать в виде жидкости. Если мы попытаемся охлаждением превратить его в жидкость, он станет твердым. Если из огнетушителя (давление около 60 атм) выпустить CO_2 в воздух, жидкость, забирая скрытое тепло, будет испаряться, превращая остальное содержимое в облако хлопьев «сухого льда».

и вся она превращается в пар. Это превращение можно наблюдать в стеклянной трубке (фиг. 108). При повышении температуры жидкость сильно расширяется, становясь менее плотной, тогда как плотность пара растет. Затем граница исчезает, но появляется вновь при охлаждении после внезапного «проливного дождя» капель жидкости. Хотя это и опасный опыт, но происходящие в нем изменения восхитительны.



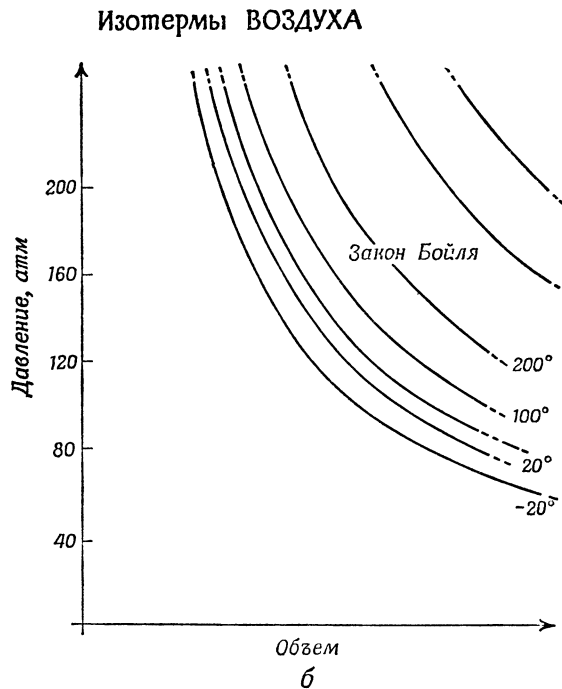
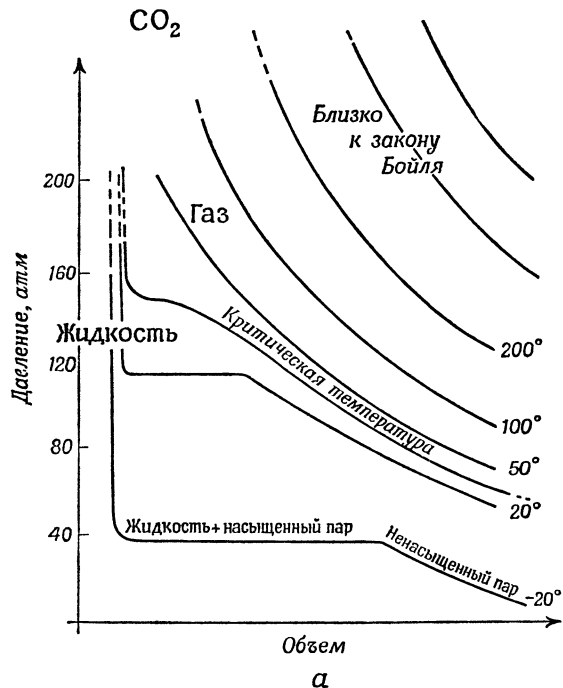
Фиг. 108. Критическая температура.

Стеклянная трубка с жидкостью и паром нагревается.

Мы еще вернемся к проблеме критической температуры после того, как расскажем о молекулярной картине испарения.

Закон Бойля и CO_2

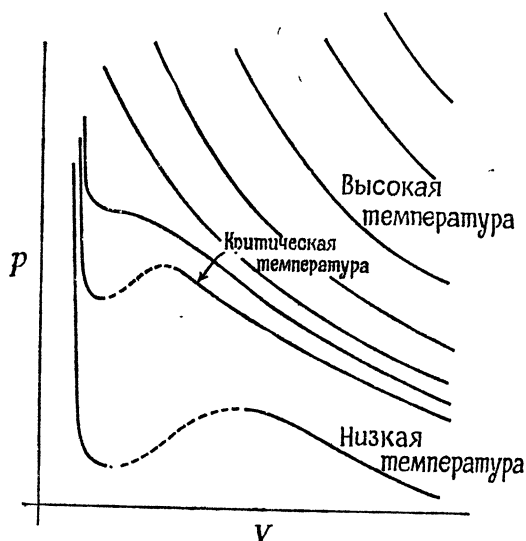
Вернитесь к фиг. 3 (стр. 331), на которой даны графики зависимости P от V для воздуха. Углекислый газ проявляет ярко выраженные особенности, а при достаточно низкой температуре (ниже критической) они обнаружатся у *любого* газа. На фиг. 109 проводится сравнение между поведением воздуха и CO_2 . Выше 31°C CO_2 — газ, и когда температура становится гораздо выше критической, он достаточно хорошо подчиняется закону Бойля. При любой температуре ниже 31°C при увеличении сжатия он превращается из ненасыщенного пара в насыщенный пар+жидкость, а затем в жидкость. *Ненасыщенный пар* при низких давлениях приблизительно подчиняется закону Бойля. Во время сжижения давление остается постоянным (равным давлению насыщенного пара). Сжать *жидкость*, конечно, трудно, поэтому для нее кривые на графике $P-V$ резко взмывают вверх.



Фиг. 109. Сравнение поведения углекислого газа с воздухом.

Графики представляют собой экспериментальные изотермы (зависимость давления от объема при постоянной температуре).

Таким образом, изотермы ниже критической температуры далеки от простых гипербол (PV — постоянно). Тем не менее усовершенствованный газовый закон Ван дер Ваальса достаточно хорошо описывает их. Об этом говорит фиг. 110, на которой для газа выбраны подходящие значения параметров a и b . В промежуточной части экспериментальной кривой (область сжижения) предсказания



Фиг. 110. Изотермы, предсказываемые модифицированным законом Ван дер Ваальса.

Сплошными линиями показаны PV -зависимости при различных температурах. Пунктирные линии показывают места, где поведение реальных веществ отличается от предсказаний.

теории расходятся с экспериментом, но предсказываемое теорией поведение системы неустойчиво и его трудно обнаружить экспериментально.

Жидкость и пар

Молекулы в жидкости тесно прижаты друг к другу (вспомните, что жидкость несжимаема). Тем не менее ее молекулы должны двигаться, по-видимому, с той же долей кинетической энергии, которая предписывается газам законом равномерного распределения. В открытом блюде жидкость медленно исчезает, превращаясь в невидимый пар, если же поместить жидкость в закрытую бутылку, испарение вскоре прекратится. В этом случае пар и молекулы воздуха находятся сверху, жидкость — внизу, температура стеклянных стенок вокруг них одна и та же. Возможно,

между ними существует равномерное распределение — одна и та же кинетическая энергия у всех компонент: молекул пара (и воздуха), молекул жидкости при их коротких перебежках между соударениями и двойная доля (кинетическая энергия + потенциальная энергия) у каждой из дрожащих молекул стекла бутылки. Для молекул газа или пара стекло — не гладкая стена, а дрожащий строй колеблющихся атомов, которые при бомбардировке отдают все, что получают. Вот почему молекулы газа отражаются от твердых стенок с той же скоростью и кинетической энергией, а от горячих стенок — с большей. Поверхность жидкости для молекул газа — тоже не зеркальная гладь, а бурлящая агрессивно настроенная среда, из которой временами вылетают молекулы пара.

Испарение

Испарение — это отрыв молекул от своих соседей на поверхности жидкости. Задача 11 показывает, что испарение должно сопровождаться охлаждением.

Задача 11. Испарение

- а) Какие экспериментальные факты свидетельствуют о притяжении молекул жидкости друг к другу?*
- б) Какие экспериментальные факты подтверждают, что в газах молекулы очень слабо притягиваются друг к другу (если вообще притягиваются)?*
- в) 1) Изобразите испаряющуюся с поверхности жидкости молекулу, которая притягивается своими соседями с помощью короткодействующих (в несколько молекулярных диаметров) сил;*
2) нарисуйте равнодействующую этого притяжения для молекулы, которая только что покинула поверхность;
3) большинству молекул, которые хотят оторваться, сделать это не удается из-за недостатка кинетической энергии; они напоминают брошенный вверх мяч, который пытается оторваться от Земли. Что происходит с такими молекулами? Изобразите путь некоторых из них.
- г) Если молекула оторвалась, она совершает работу против равнодействующей сил притяжения, превращая часть своего запаса кинетической энергии в потенциальную энергию (запасенную в поле сил молекул). Кинетическая энергия большинства молекул меньше необходимой для полного отрыва, т. е. средней кинетической энергии недостаточно для отрыва. Только некоторые из молекул с кинетической энергией выше средней могут оторваться полностью. Что тогда происходит со средней кинетической энергией молекул, оставшихся в жидкости?*
- д) Рассматривая теплосодержание как кинетическую энергию молекул, объясните, что происходит с оставшейся жидкостью после испарения части молекул?*
- е) Почему некоторые молекулы движутся сверхбыстро? Что это — особый вид молекул? Или это своего рода аристократы в мире молекул?*

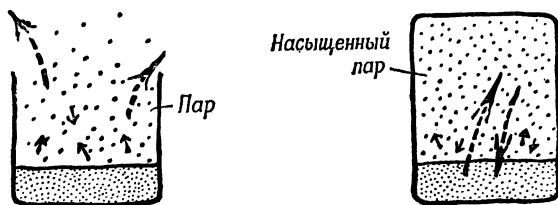
Задача 12. Испарение и температура

При повышении температуры жидкости средняя кинетическая энергия молекул возрастает и большая доля молекул будет обладать энергией, достаточной для отрыва.

- а) Как, по вашему мнению, это повлияет на скорость испарения?
- б) Если бы мы могли увеличить температуру настолько, что даже средней кинетической энергии молекул уже было бы достаточно для отрыва, что тогда произошло бы, по вашему мнению? (Над этим стоит поломать голову. «Кипение» — неправильный ответ.)

Насыщенный пар

При испарении жидкости в закрытой бутылке пары достигают стадии «насыщения», когда молекулы возвращаются в жидкость с той же быстротой, с какой покидают ее. Это «динамическое равновесие» поддерживает определенное давление насыщенного пара.



Фиг. 111. Испарение и насыщенный пар.

С увеличением температуры давление сильно возрастает. При наличии воздуха жидкость испаряется очень медленно. Конечно, молекулы воздуха не могут удерживать молекулы жидкости от испарения, но они нападают на «эмигрантов» и загоняют их назад в жидкость. Таким образом, воздух замедляет процесс насыщения, но не меняет окончательного давления.

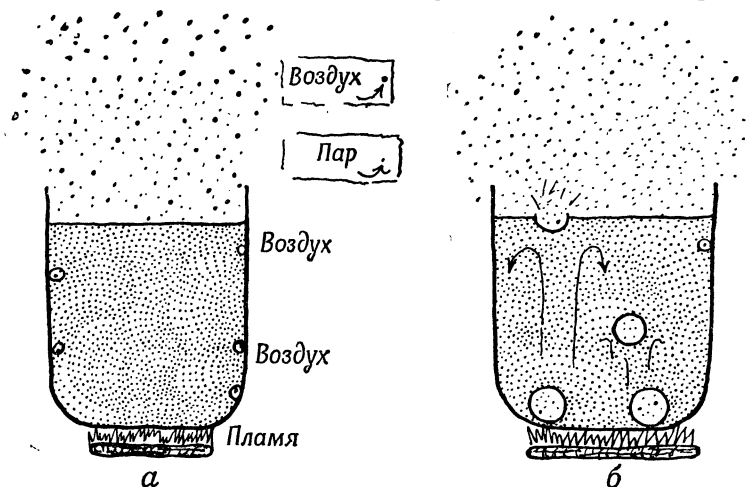
Что создает хорошее самочувствие

Охлаждение при испарении — свойство, жизненно необходимое для поддержания постоянной температуры нашего тела. Когда мы деятельны и сжигаем топливо — пищу, то 75% энергии выделяется в виде тепла. Мы должны избавиться от него, иначе температура нашего тела будет повышаться и мы будем чувствовать себя плохо. Воздух медленно уносит тепло, но испарение

с влажной кожи поглощает его очень быстро. Катящийся градом со лба пот не приносит ничего приятного, но пот, испаряющийся в сухом воздухе, охлаждает и облегчает ваше состояние. (Охлаждение в холодильниках также достигается испарением жидкости.) В сильно переполненной комнате ваше лицо покрывается испариной, затем повышается температура и начинается головная боль. Опыты показывают, что это вызывается не углекислым газом. (Даже в очень переполненной людьми комнате концентрация CO_2 не достигает и четверти той, которая способна вызвать головную боль!) Все дело во влажности, которая мешает охлаждению. Обмахните лицо веером или подставьте его под струю воздуха от вентилятора, она отгонит сырой и принесет более сухой воздух, который поможет испарению пота. Хороший кондиционированный воздух должен быть сухим и прохладным, а не холодным и влажным, какой дают некоторые дешевые установки.

Кипение

Жидкость испаряется при любой температуре. Если вода находится чуть ниже точки кипения, то пар поднимается с поверхности



Фиг. 112. Кипение.

а — вплоть до точки кипения жидкость испаряется только с поверхности;
б — в кипящей жидкости испарение идет с поверхности и в пузырьках пара.

в виде многочисленных молекул, которые легко пробиваются через окружающий воздух. Когда же вода нагрета до точки кипения

пия, внешняя поверхность испаряет чуточку больше, но приходит в действие механизм кипения; наряду с поверхностным испарением начинается испарение в растущие пузырьки пара. Именно эти пузырьки насыщенного пара и являются основным признаком кипения. Достигнув поверхности, пузырьки лопаются и извергают пар, так что в кипящей жидкости испарение идет быстрее. Однако для поддержания испарения необходим постоянный приток тепла, возмещающий охлаждение при испарении. Но почему жидкость не кипит, пока она не нагрета до определенной температуры, и почему температура при кипении остается постоянной? Почему точка кипения на вершине горы понижается?

Задача 13. Условия кипения

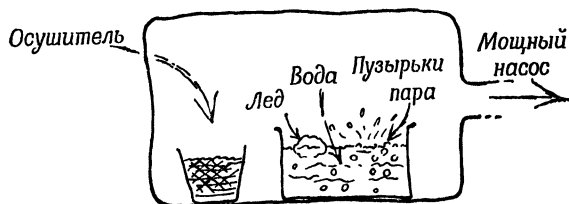
Пузырьки пара в жидкости — это единственный признак кипения. Обычно они образуются на дне кастрюли, ибо там жидкость горячее. Вокруг растущего пузырька пара находится вода, которая старается его сжать, сдвинуть, а внутри него насыщенный пар стремится расшириться.

- а) Если пузырьки не сжимаются, а могут расти, то каково должно быть давление пара внутри них по сравнению с давлением жидкости снаружи?*
- б) Каким приблизительно должно быть давление жидкости на небольшой глубине?*
- в) Из предыдущего получается, следовательно, что кипение не может начаться до тех пор, пока жидкость не нагреется настолько, что давление ее пара будет равно _____?*
- г) Если жидкость во время кипения станет еще горячее, давление пара возрастает. Что произойдет с пузырьками? И что вследствие этого произойдет с температурой жидкости? (Вспомните, что испарение всегда отбирает тепло.) Какой вывод можно сделать относительно температуры кипения?*
- д) (Трудный.) Демонстрация поверхностного натяжения показывает, что давление внутри маленьких мыльных пузырей больше, чем внутри больших. Поэтому мы ожидаем, что для преодоления поверхностного натяжения маленькие пузыри при кипении должны иметь дополнительное внутреннее давление. Это дополнительное давление должно обеспечиваться давлением пара. Следовательно, для возникновения очень маленьких пузырьков пара температура жидкости должна быть _____?*
- е) Кипение жидкости зачастую характеризуется нерегулярным «взрывным» движением. Как это получается в соответствии со сказанным выше?*

Поставьте кружку с водой на пламя горелки и наблюдайте. Посмотрите, как начинается кипение; вы увидите, что роль «зачинчиков» играют маленькие пузырьки воздуха.

Уменьшая внешнее давление, можно заставить жидкость кипеть при все более и более низких температурах. В высоких горах кипит теплая на ощупь вода.

Можно даже заставить воду кипеть и замерзать в одно и то же время, если температура будет немного превышать 0°C ¹⁾. При очень низком давлении точка кипения лишь немного превышает 0°C , а точка замерзания (при полном отсутствии давления) поднимается несколько выше нуля и встречается с точкой кипения.



Фиг. 113. «Тройная» точка.

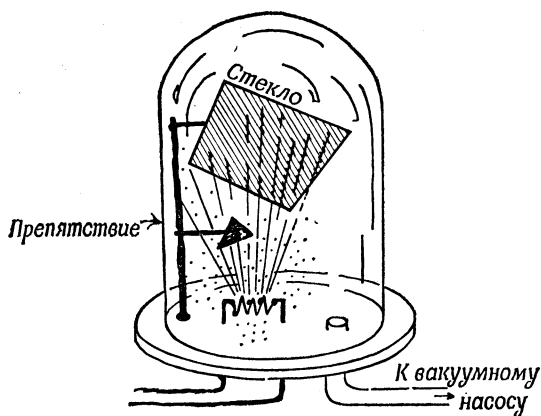
При очень низком давлении холодная вода кипит, замораживая при испарении остальную воду. В этой «тройной» точке кипение и замерзание происходят одновременно. «Тройная» точка возможна при таком давлении и температуре, когда возникает равновесие твердого тела, жидкости и пара. Для воды «тройная» точка расположена чуть выше 0°C .

Если откачивать пар, то быстрое испарение охлаждает воду до тройной точки и даже превращает часть воды на поверхности в лед, тогда как кипение продолжается и через лед пробиваются пузырьки пара.

Средний свободный пробег и зеркало

Лучшие из современных зеркал изготавливаются путем нанесения на поверхность стекла в высоком вакууме атомов металла. Для этого маленький кусочек алюминия нагревают до плавления и испарения раскаленной электрическим током вольфрамовой проволокой. Испаряющиеся при этом с большой скоростью атомы барабанируют по стенкам. Помещенная поблизости стеклянная пластинка захватывает атомы, и получается прекрасная зеркальная поверхность — от прозрачной металлической пленки до толстого отражающего покрытия. Если вакуум достаточно хорош, любое препятствие дает резкую «тень» на чистом стекле. Это говорит о том, что атомы металла летят от расплавленной капельки по прямым линиям. Если же остатки воздуха сокращают средний свободный пробег атомов, то края тени оказываются размытыми.

¹⁾ Эта «тройная» точка выбрана теперь в качестве «фиксированной» точки на шкале температур. Международное соглашение отвергло в качестве фиксированных точек температуру таяния льда и кипения воды и приняло эту точку и абсолютный нуль. Однако шкала обычных термометров осталась прежней.



Фиг. 114. Изготовление зеркала путем испарения алюминия в вакууме.

Препятствие отбрасывает резкую «тень» на чистое стекло.

Критическая температура и кинетическая теория

Теперь мы можем дать интерпретацию критической температуры. Молекулы газа при данной температуре независимо от давления обладают определенной кинетической энергией. Если температура высока, то, как не сжимай молекулы, этой кинетической энергии будет достаточно, чтобы разорвать силы, связывающие молекулы в жидкость. При более низкой температуре, если мы сжимаем молекулы настолько, что у каждой из них оказывается достаточно близких соседей, может образоваться жидкость.

Ван-дер-ваальсово притяжение a/V^2 в жидкости действует наподобие заряда: оно связывает молекулы в подвижную массу с некоторой упорядоченностью среди близких соседей, но без постоянной привязанности к своему месту, как в твердом кристалле. Таким образом, критическая температура представляет собой ту границу, за которой кинетическая энергия становится слишком большой, чтобы молекулы могли собираться в группы. Если же мы начинаем с жидкости, из которой в виде пара вылетают только некоторые «сверхбыстрые» молекулы, то можем поднимать температуру до тех пор, пока даже «средняя» молекула не будет обладать кинетической энергией, достаточной для отрыва. После этого жидкость распадается на части и превращается в газ!

Задача 14. Критическая температура

- а) При повышении температуры поверхностное натяжение уменьшается. Каким оно должно быть при критической температуре?

- б) Как установить критическую температуру по измерению поверхностного натяжения?
- в) Какой будет скрытая теплота испарения, т. е. теплота, необходимая для превращения 1 кг жидкости в пар без изменения температуры (при критической температуре)?
- г) Обычно жидкость гораздо плотнее, чем пар. Каково соотношение между плотностью жидкости и пара при критической температуре?

Низкие температуры. Жидкий воздух

Критическая температура воздуха составляет -140°C . Воздух охлаждается ниже этой температуры, а затем посредством сжатия и охлаждения ¹⁾ превращается в жидкость. Для уменьшения испарения жидкий воздух хранится в сосуде с двойными стенками, между которыми создается вакуум. На открытом воздухе жидкий воздух постоянно кипит при температуре около -190°C .

Демонстрационные эксперименты с жидким воздухом показывают следующее:

Жидкий воздух (кислород, азот) очень холоден, хотя и кипит.

Он замораживает все живое — и животных, и цветы, делает резину хрупкой, а свинец упругим. Обычный стол для него очень горяч, так что он бежит по нему на подушке из слоя пара, подобно воде на раскаленной докрасна печи. При кипении его на открытом воздухе термометр (газовый, гелиевый) показывает температуру около -190°C . При испарении и нагревании до комнатной температуры объем увеличивается в 800 раз.

Жидкий азот плавает на воде, кипит при более низкой температуре, чем кислород, так что может конденсировать жидкий кислород из атмосферы.

Жидкий кислород тонет в воде, цвет его голубой, он немного магнитный, может, если надо, служить компактным источником кислорода для поддержания горения. (Сигары и пучок тонкой стальной проволоки вспыхивают, если их поджечь, предварительно пропитав жидким кислородом, а гигроскопическая вата становится хорошей взрывчаткой.)

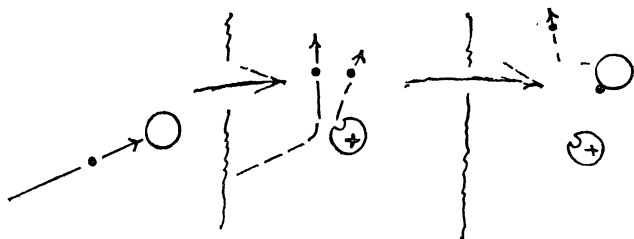
Высокие температуры. Ионы в газах

Если увеличивать температуру твердого тела, то его излучение будет превращаться из инфракрасного в видимый красный, оранжевый..., раскаленный белый. Свет пламени спички обусловлен

¹⁾ Наиболее простая схема сжижения для водорода и гелия — самых трудных с этой точки зрения газов — состоит в том, чтобы заставить газ толкать механический поршень, тем самым охлаждаясь.

раскаленной добела сажей. Мы не будем обсуждать здесь, как электроны колеблющегося атома испускают свет — это слишком сложно. Однако раскаленные газы светятся по более простой причине и дают дополнительные сведения о строении атомов. При достаточно высоких температурах атомы можно возбуждать с помощью соударений.

Большинство соударений между атомами — упругие, т. е. сохраняется кинетическая энергия. Но при достаточно сильных соударениях кинетическая энергия может израсходоваться на отрыв атома от сложной молекулы, а очень сильные удары могут



Фиг. 115. Образование ионов.

Ударившись об атом, электрон выбивает из него электрон и оставляет положительный ион. Отделившийся электрон может присоединиться к другому атому, образовав отрицательный ион.

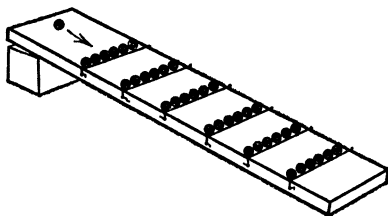
выбить из атома отрицательный электрон, оставив атом положительно заряженным. Этот процесс создания электрически заряженных частиц в газе называется *ионизацией*. Чтобы оторвать электрон от атома, требуется значительная энергия; при этом кинетическая энергия переходит в электрическую потенциальную энергию. При комнатной температуре соударения, приводящие к ионизации, слишком редки, чтобы их следовало принимать в расчет. При температуре пламени, скажем, 1200°C кинетическая энергия некоторых молекул газа уже достаточна для ионизации ударом, хотя ионов всего несколько штук на миллиард, но и это количество уже заметно.

Атомам может быть причинен и несколько меньший ущерб. Не отрываясь от атома, электроны могут подняться на более высокий уровень. Получается «возбужденный» атом. Когда электроны возбужденного атома возвращаются на свое нормальное место, дополнительная энергия выделяется в виде излучения. Именно так, при возвращении электронов на низшие, наиболее стабильные энергетические уровни атомы излучают свет. Яркий желтый свет пла-

мени, в которое бросили щепотку соли, зелено-голубой свет от меди или пылающий красный свет неоновой рекламы — все это излучается возбужденными атомами при возвращении в нормальное состояние или ионами, которые, захватив электроны, переходят из возбужденного в нормальное состояние.

Светящиеся газы могут проводить электрический ток, подтверждая присутствие в них заряженных ионов, переносящих этот ток. Ионы создаются в пламени главным образом благодаря выделению химической энергии, и местами возникают атомы более быстрые, нежели большинство атомов газа в пламени. При высоких

Фиг. 116. Модель лавины («разряда»).

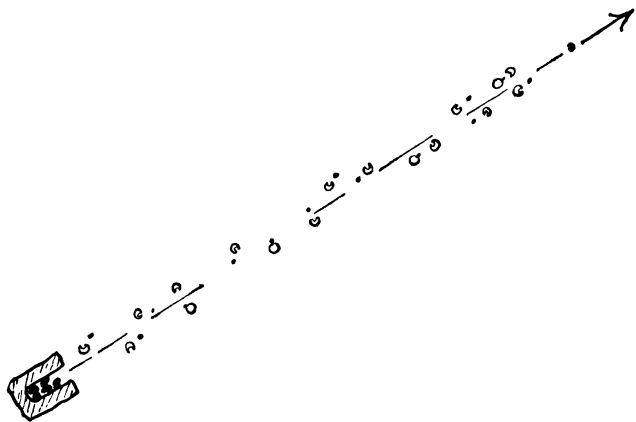


температурах, скажем 6000°C , как на поверхности Солнца, обычные соударения могут возбуждать достаточное количество атомов для создания видимого свечения. (Этот свет Солнца и других звезд тонет в гигантском потоке излучения, идущего из пышущих жаром недр.)

Однако сильное нагревание — слишком сложный способ получения ионов. Проще получить их с помощью электрического разряда. Приложим к газу сильное электрическое поле. При своем возникновении сам ион и оторванный от него электрон ускоряются полем и могут приобрести достаточно энергии, чтобы при соударении с молекулой газа создать *еще один ион*. Таким образом, каждый ион будет создавать вторичные ионы, которые в свою очередь также будут увеличивать число ионов. Возникает размножающийся лавинный, или цепной, процесс, который мы называем электрическим разрядом. Его можно проиллюстрировать на модели, изображенной на фиг. 116. В небольшие канавки на наклонной планке уложены шарики. Они представляют молекулы, а расстояние между канавками — средний свободный пробег. Шарик, изображающий ион, выпускается сверху планки и катится вниз, пока не встретит ряд «молекул». Если наклон невелик (слабое электрическое поле), «ион» остановится. Если наклон побольше, то шарик вытолкнет другой, а сам остановится. Возникает небольшой ток.

Но если наклон достаточно велик (сильное электрическое поле), «ион» вытолкнет несколько шариков, каждый из которых вытолкнет еще несколько, и т. д. Возникает лавина («разряд»).

Хороший способ создать тонкую цепочку ионов — это пропускать через газ (жидкость или твердое тело) заряженную частицу с очень высокой энергией (ядро или электрон). Своим электрическим полем этот снаряд будет выбивать на пути электроны из многих атомов, оставляя тонкий след в виде ионизованного газа. Именно так поступают α -частицы и β -лучи радиоактивных атомов.



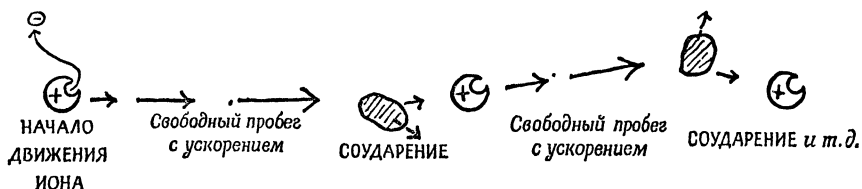
Фиг. 117. Очень быстрые заряженные частицы оставляют на своем пути след из ионов.

В одной из последующих глав мы расскажем, как можно сфотографировать этот след или воспользоваться им в счетчике Гейгера.

В слабом электрическом поле ионы движутся подобно падающим в воздухе частичкам пыли. Поле силы тяжести ускоряет частички пыли, но молекулы воздуха при каждом соударении отбирают часть приобретенной кинетической энергии. В среднем частичка теряет все, что приобретает за период между двумя соударениями, и кажется, будто она падает с постоянной скоростью, а ее вес компенсируется трением о воздух. С микроскопической точки зрения ее движение представляет собой целый ряд падений с ускорением, замедляемых соударениями. Если такая частичка обладает электрическим зарядом, ее можно «тянуть» электрическим полем. Для маленькой частички нетрудно сделать так, чтобы притяжение

электрического поля намного превосходило притяжение поля силы тяжести (из-за малой массы). При этом частичка будет двигаться с гораздо большей постоянной скоростью. Но движение снова будет представлять собой серию прыжков с ускорением, замедляемых трением о воздух. (Именно так обстоит дело с крайне маленькими заряженными капельками масла при измерении заряда электрона в опыте Милликана.)

С электрически заряженными ионами во многом происходит то же самое. Ионы ускоряются электрическим полем до тех пор, пока не столкнутся с молекулами газа и не поделятся с ними дополнительной кинетической энергией, приобретенной от поля.

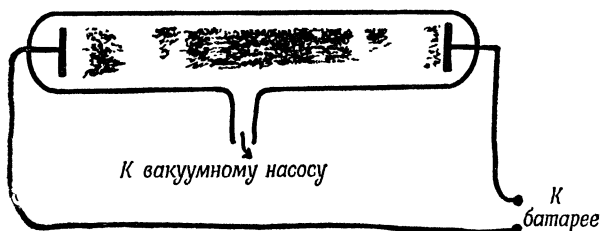


Фиг. 118. Путь иона в слабом электрическом поле.

Затем они вновь ускоряются до следующего соударения и т. д. (фиг. 118). В *слабых* полях соударения ионов упругие; приобретенной между двумя соударениями кинетической энергии недостаточно для создания других ионов. Они просто продолжают свой зигзагообразный путь, немного нагревая газ. Для создания дополнительных ионов они должны успеть набрать между двумя соударениями довольно много энергии, а для этого необходимо увеличить либо электрическое поле, либо длину свободного пробега. В обычном воздухе разряд возникает в довольно сильном поле, скажем $3 \cdot 10^6$ ньютон/кулон, но выкачайте половину воздуха и средний свободный пробег вдвое удлинится. На этом более длинном пути в поле ионы перед соударениями будут набирать вдвое больше энергии, так что для появления разряда потребуются поле вдвое слабее. А если выкачать 99,9% воздуха, так что давление станет $\frac{1}{1000}$ атм, то ионы будут размножаться гораздо более слабым полем. (Вывод: сжатый воздух — гораздо лучший изолятор, чем обычный.)

Приложите к металлическим электродам в длинной стеклянной трубке напряжение в 100 000 в и медленно выкачивайте из нее воздух. При атмосферном давлении в трубке ничего не произойдет. Но через разрядник снаружи будет проскакивать искра. При

$\frac{1}{100}$ атм в трубке появятся струящиеся разряды. При $\frac{1}{1000}$ атм эти разряды захватят всю трубку. Теперь в трубке окажется сложное месиво нейтральных молекул и атомов (некоторые из них возбуждены), положительных ионов, движущихся в одном направлении, отрицательных, движущихся в другом, несущихся сломя голову электронов, рентгеновских лучей, ультрафиолетового и видимого света (он-то и «светит»). Покройте трубку изнутри минералом, который светится под действием ультрафиолетовых лучей, и вы получите современную люминесцентную лампу. Выкачайте воздух до $\frac{1}{1000\ 000\ 000}$ атм, так что там останется очень мало светящихся молекул, и впустите туда неон до давления $\frac{1}{100}$ атм.



Фиг. 119. Разрядная трубка.

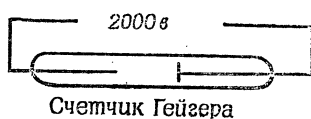
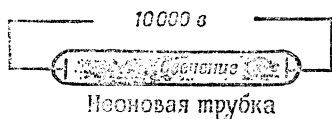
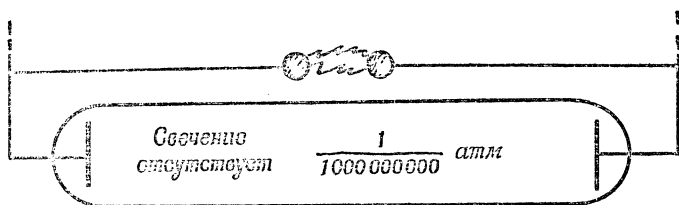
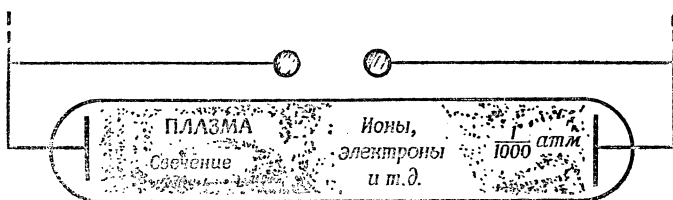
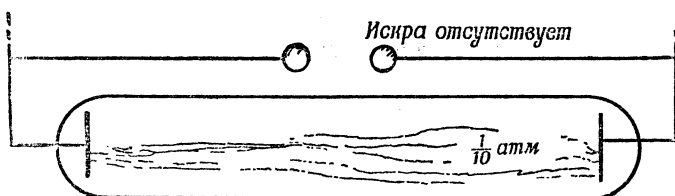
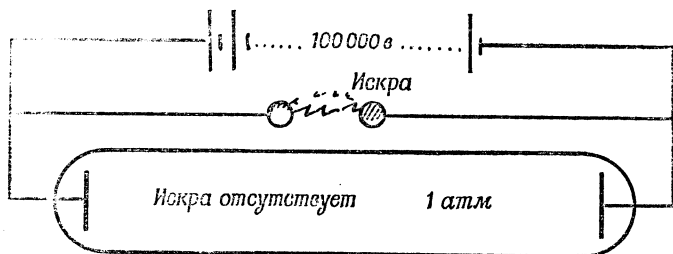
Получится трубка неоновой рекламы. Впустите туда несколько больше газа и уменьшите напряжение до величины, достаточной для возникновения разряда, и вы получите счетчик Гейгера.

Лет сто назад эта смесь ионов, или *плазма* ¹⁾, была простым словесным украшением того, что происходило в таинственных трубках с «электрическими разрядами». Полвека назад при выяснении атомной структуры плазма была рассортирована на составляющие. Независимо от состава газа в столкновениях отщеплялись отрицательные электроны. Остатки же атомов, положительные ионы, различались в зависимости от сорта газа как массой, так и цветом свечения. Но для использования электронов и ионов в атомной физике вам нужны кое-какие знания об электрических цепях (гл. 32 ²⁾) и электрических полях (гл. 33 ³⁾). После этого мы

¹⁾ Словом «плазма» теперь обычно называют «ободранные» атомные ядра и электроны, т. е. вещество в «разодранном» виде, существующее в горячих звездах и термоядерных экспериментах.

²⁾ Гл. 32 («Электрические цепи») входит в т. 3 настоящего издания.

³⁾ Гл. 33 («Электростатика») входит в т. 3 настоящего издания.

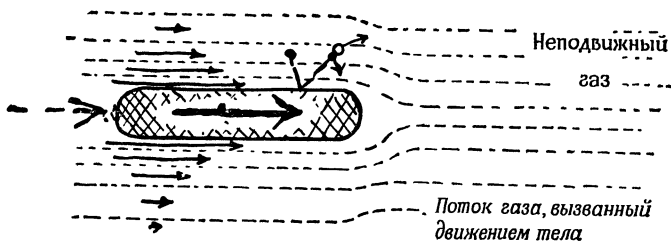


Фиг. 120. Разрядная трубка с газом при различных давлениях.

вернемся к электронам,... ионам,... атомам. А затем, используя «яростные» удары снарядов, вылетающих из атомов, будем изучать атомные ядра.

Вязкость (внутреннее трение в газах)

Трение при медленном движении в газе — это простая «передача» импульса между блуждающими молекулами. Измерение трения в газе рассказывает нам о размерах молекул газа. Допустим, что в газе медленно движется твердое тело, спокойно увлекая за собой близлежащие слои газа. Каждая молекула, ударяясь о тело, отскакивает от него, добавив к своему случайному движению движение тела вперед. Она отлетает, обогатившись направленным вперед импульсом, и переносит этот импульс на расстояние



Фиг. 121. Внутреннее трение в газе.

Медленно движущееся через газ твердое тело тормозится молекулами, «растаскивающими» его импульс.

свободного пробега до первого столкновения. Там она отдает свою долю движения вперед, а затем либо снова она, либо ее «уполномоченные» возвращаются к движущемуся телу, но с меньшим количеством движения и вновь отскакивают, обогащенные движением вперед. Таким способом при каждом соударении с молекулой газа движущееся тело «за свой счет» увеличивает ее импульс «вперед». Растрачивая свой импульс, тело движется, как если бы его тормозила сила трения. Именно такое «разворовывание» импульса и является причиной внутреннего трения в газах. Блуждая в потоке, молекулы при столкновениях передают этот краденый импульс друг другу, пока он не достигнет внешних стенок.

Предположим теперь, что газ откачали и в нем осталась лишь половина бывшего множества молекул. Как при этом изменится сила трения? Теперь о движущееся тело ударяется и уносит его импульс в два раза меньше молекул. Сила трения за этот счет должна быть вдвое меньше. Однако средний свободный пробег

будет вдвое больше, так что возвращающиеся молекулы приходят от (вдвое) более далеких слоев и, следовательно, приносят меньший импульс. Каждая молекула за счет этого должна быть гораздо более эффективна при «отбирании» направленного вперед импульса, и трение в газе должно возрасти. Детальная проверка показывает, что оба механизма полностью компенсируют друг друга: прирост за счет удвоения среднего свободного пробега полностью сдается уменьшением вдвое числа молекул. (Прочитайте на стр. 576 о «модели», иллюстрирующей внутреннее трение в газе.) «Воришек», растаскивающих импульс, стало наполовину меньше, но ловкость каждого из них вдвое возросла — теперь каждый уносит вдвое больше. Отсюда удивительное предсказание: *внутреннее трение в газе не должно зависеть от давления*. Это кажется абсурдным, ибо получается, что когда мы выкачиваем из сосуда весь воздух, пылинки будут падать, а маятник будет замедляться с одинаковой скоростью при 1 атм и при $1/2$, $1/4$, $1/10$, $1/100$, $1/1000$... атм! Для маленьких предметов это действительно верно в широкой области давлений. Проверьте, хотя сделать это не просто.

ДЕМОНСТРАЦИОННЫЕ ОПЫТЫ

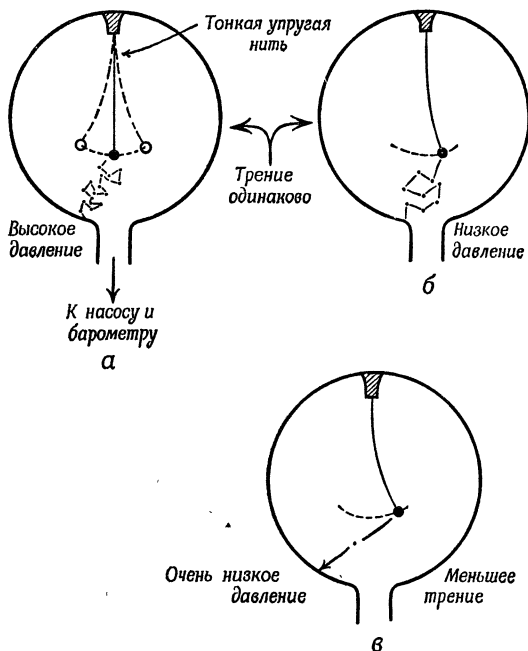
Опыт 1. Ко дну стеклянной колбы прикреплен тоненький кварцевый (из чистого расплавленного песка) стебелек с маленьким набалдашником. Если запустить этот крошечный маятник, он будет колебаться, но трение о воздух с течением времени уменьшит амплитуду его колебаний. Выкачивая все больше и больше воздуха, мы обнаружим, что затухание из-за трения в воздухе остается почти одним и тем же, как и предсказывает кинетическая теория. Однако это не может быть верно до самого конца, т. е. до полного вакуума. Наша теория должна лопнуть, она сама же предсказывает свой крах. Трение будет оставаться неизменным, пока средний свободный пробег увеличивается пропорционально уменьшению числа молекул. Но когда выкачено столько газа, что средний свободный пробег сравнивается с размерами колбы, дальнейшее выкачивание уже не будет увеличивать пробега, а лишь уменьшит

число переносчиков импульса. Так что внутреннее трение постоянно вплоть до давлений, при которых длина свободного пробега порядка размеров колбы; при меньших давлениях внутреннее трение будет падать до нуля. Этим можно воспользоваться для оценки среднего свободного пробега. Выкачивайте воздух из колбы до тех пор, пока амплитуда колебаний маятника не перестанет уменьшаться. Измерьте давление оставшегося в колбе воздуха и радиус колбы. Затем найдите средний свободный пробег при атмосферном давлении.

Опыт 2. Вот запись данных одного опыта. Радиус сферической колбы составлял 0,10 м. Внутреннее трение было почти постоянным, начиная от 1 и до 0,00001 атм. При давлении в 1 миллионную долю атмосферы трение заметно уменьшилось. Следовательно, при $1/1\,000\,000$ атм свободный пробег составляет 0,10 м.

При 1 атм давление и плотность будут в 1 000 000 раз больше (закон Бойля), а средний свободный

приближенные данные, и средний свободный пробег может оказаться в несколько раз больше или меньше.



Фиг. 122. Проверка независимости внутреннего трения в газе от давления.

а — высокое давление; б — низкое давление; в — при очень низком давлении средний свободный пробег превышает размеры колбы.

Дальнейшее удаление газа уменьшает внутреннее трение.

пробег в 1 000 000 раз меньше. Поэтому он равен $(0,1 \text{ м}) / (1\,000\,000)$, или 10^{-7} м , т. е. $1000 \text{ \AA}$.

Эти данные подобраны так, чтобы получить правильный свободный пробег, и все же они вполне возможны. Настоящий эксперимент дает

Средний свободный пробег можно найти из точных измерений скорости протекания газа через капиллярную трубку с тем же механизмом трения.

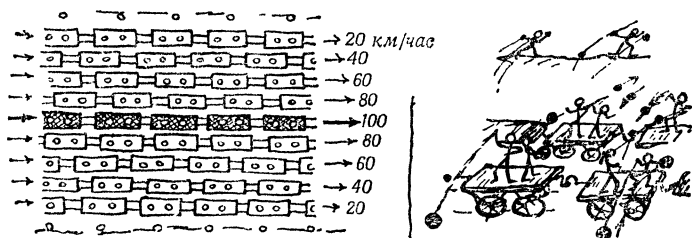
Для атмосферного воздуха это дает около 10^{-7} м , или $1000 \text{ \AA}$.

«Модель», иллюстрирующая внутреннее трение в газе

Механизм внутреннего трения в газах или вязкости можно проиллюстрировать следующей аналогией. Представьте себе железную дорогу. Имеется девять путей в направлении с севера на юг. По центральному пути на север идет скорый поезд с постоянной скоростью 100 км/час . По другим путям в том же направлении движутся длинные товарные поезда с открытыми платформами. Скорость соседних со скорым поездов 80 км/час , тех, которые идут по следующим путям, 60 км/час , затем 40 км/час и, наконец, крайних 20 км/час . На каждой из платформ стоят по два человека и регулярно бросают с востока

на запад теннисные мячи. Кроме того, они ловят мячи, которые им бросают с соседнего поезда, так что масса поездов не уменьшается и не увеличивается. По краям полотна тоже стоят люди, которые ловят мячи, бросаемые с крайнего товарного поезда, и обрасывают их обратно. Имеются люди и на скором поезде, они тоже ловят теннисные мячи и бросают их на восток и на запад. Им ничего не известно о физике относительных скоростей, и, не учитывая своего движения, они метят прямо в соседний поезд, т. е. бросают мячи перпендикулярно направлению движения поезда. Поэтому брошенный с поезда мяч переносит как боковой импульс, так и импульс в северном направлении, соответствующий скорости поезда.

Мячи в среднем попадают в скорый поезд с той же частотой, что и вылетают из него, т. е. перебрасывание мячей не изменяет массы. Но оно уносит импульс.



Фиг. 123. Иллюстрация к приведенному примеру.

Каждый мяч, брошенный со скорого поезда, движется *вперед* (на север) со скоростью 100 км/час, и уносит некоторый импульс, направленный вперед. Каждый мяч, попадающий на скорый поезд с соседних товарных поездов, идущих со скоростью 80 км/час, приносит меньший импульс, направленный вперед. В итоге скорый поезд теряет больше импульса, чем получает. Это скажется в виде тормозящей поезд силы, и не компенсируй эту игру тяга локомотива, поезд затормозит. (Точки приложения силы — руки людей, когда они ловят возвращающиеся к ним мячи. Мяч движется вперед медленнее, чем человек, который должен выбросить вперед руки и смягчить удар. Когда человек ловит мяч, то ускоряет его до скорости поезда.) Промежуточные поезда тоже теряют и приобретают мячи с одинаковой частотой, но в этой модели с одинаковой частотой идет потеря и приобретение ими импульса, ибо с одной стороны летят более быстрые мячи, а с другой — более медленные. Те люди, которые стоят по краям полотна, получают импульсы, направленные вперед, и испытывают силу, увлекающую их вперед.

Такова модель движения твердого тела в газе. Скорый поезд представляет собой движущееся тело, товарные поезда — прилегающие к нему слои газа, а мячи — летящие вбок молекулы.

Удалим теперь половину мячей и половину ловящих их людей, оставив половину платформ пустыми (так что мяч может пролетать на платформу на более удаленном пути). Прежде мяч всегда ловился на следующем пути. Теперь же в среднем до захвата он будет пролетать через соседний путь. Средний свободный пролет мяча удвоился! Скорый поезд теперь теряет мячи, летящие вперед со скоростью 100 км/час, а захватывает мячи, летящие вперед с двух более удаленных путей со скоростью только 60 км/час. Разность скоростей

вместо 100—80 будет 100—60, так что каждый обмен мячами в среднем означает вдвое больший импульс. Однако вдвое уменьшилось и количество мячей. Тормозящая сила, следовательно, остается той же! мячей вдвое меньше, а вклад каждого в тормозящую силу вдвое больше.

Задача 15. Опыт Цартмана

- Опишите по собственному рисунку способ, которым Цартман измерял скорости молекул.
- Покажите на рисунке пленку в барабане.
- Изобразите развернутую пленку и пометьте на ней ту запись, которую бы вы ожидали увидеть для газа, состоящего из молекул одного сорта.
- Изобразите запись, которую вы ожидаете увидеть для смеси двух газов, масса молекул одного из которых в 4 раза больше массы молекул другого. Подпишите ваши метки.
- Объясните, как вы выбрали расстояние между метками.

Задача 16. Формула для опыта Цартмана

- Допустим, что в этом опыте молекулы со скоростью v дают на пленке метку на расстоянии y от нулевой. Как изменится y , если v удвоится? Как изменится y , если удвоить одну из следующих величин, оставив другие без изменения:
 скорость вращения барабана, R оборотов в 1 сек?
 радиус барабана r ?
 длину барабана по оси L ?
- Выведите формулу для вычисления v из измерений y , R и t , θ .

Задача 17. Вязкость

- Когда небольшой предмет плавно движется в воздухе, увлекая его за собой, воздух оказывает «сопротивление внутреннего трения» и предмет останавливается. Опишите своими словами механизм внутреннего трения в газе с молекулярной точки зрения.
- Если давление воздуха уменьшить вдвое, то как это скажется на скорости молекул, отраженных от движущегося тела, которая обуславливает тормозящую силу?
- Если давление воздуха уменьшить вдвое, то как это повлияет на средний свободный пробег молекул?
- Почему вы думаете, что изменение среднего свободного пробега повлияет на трение движущегося тела?
- Как, по-вашему, подействует на внутреннее трение уменьшение давления воздуха вдвое?
- Какое вы предвидите при этом ограничение?

Задача 18. Молекулы в высоком вакууме

Используя упоминавшиеся в этой главе данные и считая радиолампу прямоугольным ящиком размером $2\text{ см} \times 2\text{ см} \times 5\text{ см}$ и объемом $20/10^6\text{ м}^3$, найдите:

- Число молекул воздуха в нем при атмосферном давлении.
- Число оставшихся молекул при обычном высоком вакууме (10^{-9} атм).
- Число соударений в 1 сек выделенной молекулы с другими в высоком вакууме.
- Число ударов в 1 сек выделенной молекулы о стенки лампы в высоком вакууме.

Задача 19. Модель газа

(Эта модель помогает получить представление о молекулах газа.) Допустим, что теннисный мяч, наполненный воздухом при атмосферном давлении, можно увеличить до размеров Земли, сохранив то же число «молекул газа», увеличенных в том же масштабе. Внутренний радиус мяча примите равным 0,032 м, а радиус Земли — $6,4 \cdot 10^6$ м.

- а) Дайте грубую оценку следующих параметров «молекул» в увеличенной модели: 1) диаметра, 2) среднего расстояния между ними, 3) средней длины свободного пробега.*
- б) Опишите указанные параметры в обычных мерах типа «величиной с миллиардный шар» или «на расстоянии вытянутой руки».*

Задача 20. Отражение и энергия

- а) Внутри тонкостенного резинового мячика находится атмосферный воздух. Мячик с силой ударился о массивную стенку и отскочил от нее. Воспользовавшись своим знанием кинетической теории, опишите изменения, происходящие с воздухом во время удара о стенку и отражения.*
- б) Если кусочек свинца ударяется о стальную мишень, он нагревается. Но если о мишень ударяется летящий с той же скоростью резиновый мячик и отскакивает от нее (почти с прежней скоростью), он едва ли нагреется. Обсудите эту разницу.*

Задача 21. Диффузионный насос

Ртутный (или масляный) диффузионный насос особенно хорош для откачивания остаточного водорода или гелия. Допустим, что массивная молекула ртути и некая легкая молекула испытывают лобовое столкновение. Предскажите их движение после столкновения. (Посмотрите задачу в конце гл. 26.) Опишите, как такие столкновения приводят к быстрому откачиванию.

ИНТЕРЛЮДИЯ

МАТЕМАТИКА

И ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

«Математика в определенном смысле представляет собой язык науки, основу успешной работы в области всех естественных и некоторых социальных наук».

*Каталог Принстонского
университета (1947—1959)*

«Коль скоро разум жадность не поборет,
То небо для него ж?»

Роберт Браунинг

Хотя эта интерлюдия—лишь вспомогательная часть настоящего курса, тем не менее она затрагивает самые основы физической науки.

ГЛАВА 31 • ТОЧНЫЙ ЯЗЫК, СТЕНОГРАФИЧЕСКАЯ МАШИНА И «БЛЕСТЯЩИЙ КАНЦЛЕР» НАУКИ. НОВАЯ НАУКА И НОВЫЕ ВЗГЛЯДЫ

«Математика — королева естественных наук».

К. Ф. Гаусс (~1840 г.)

«Математика занимается исключительно связями понятий друг с другом, не учитывая их отношения к опыту. Физика тоже имеет дело с понятиями, однако эти понятия приобретают физическое содержание только после четкого определения их связи с предметом исследования... Теория относительности — это физическая теория, основанная на внутренне непротиворечивой физической интерпретации ... понятий движения, пространства, времени».

А. Эйнштейн

Математика — язык науки

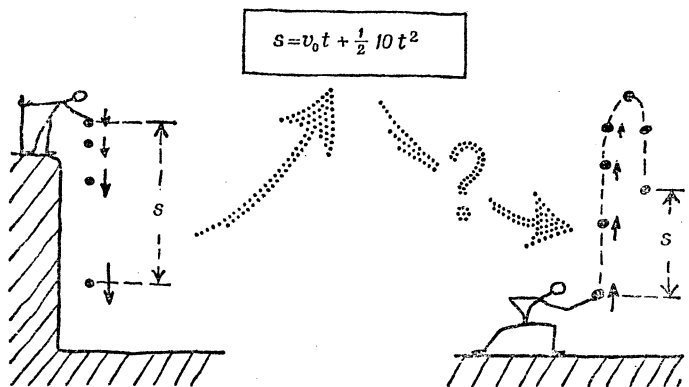
При сборе информации, формулировке законов и создании основ науки ученым для выражения мыслей нужен ясный язык. Обыденный язык гораздо грубее и туманнее, чем это кажется большинству людей. Выражение «я люблю овощи» столь неопределенно, что недостойно цивилизованного языка, оно несколько не лучше нечленораздельных криков дикаря. «Термометр дает температуру воды». Термометр ничего не «дает». Все что вы делаете — это, внимательно поглядев на термометр, пытаетесь сделать выводы и почти наверняка немного ошибаетесь. Термометр к тому же вовсе не показывает температуру воды. Он показывает лишь свою собственную температуру. Кое-что из этих упреков относится к существу вопроса, но слова отнюдь не помогают делу. Мы можем при желании сделать свои утверждения более определенными, но это приведет к выражениям, которые потребуют целого ряда комментариев. Язык же математики выражает смысл удивительно кратко и откровенно. Когда мы пишем $2x^3 - 3x + 1 = 0$, то делаем очень определенное, хотя и не далеко идущее утверждение относительно x . Одно из преимуществ применения математики в науке состоит в том, что она помогает точно записать нашу мысль, избегая неясности и двусмысленности. Запись $\Delta v / \Delta t = 9,8$ ясна и без привлечения длинных словесных описаний ускорения, а $y = 4,9t^2$ говорит о падении камня без лишних слов о массе и притяжении.

Великое свойство математики — ее стенографичность при установлении связей и при проведении сложнейших рассуждений, когда мы соединяем воедино несколько соотношений. Равноускоренное движение можно определить так: «Пройденное расстояние равно сумме произведений начальной скорости

на время и половине ускорения на квадрат времени», однако короче написать: $s=v_0t+\frac{1}{2}at^2$. Если бы вместо алгебры мы пытались оперировать словесными утверждениями, то по-прежнему могли бы из двух выражений для ускоренного движения получить третье по аналогии с выводом формулы $v^2=v_0^2+2as$ в приложении 1 гл. 1¹⁾. Однако без компактной алгебраической записи рассуждения были бы убийственно громоздкими. Идя дальше, туда, где используется отточенная математика дифференциального исчисления, мы, рассуждая на словах, пришли бы к невообразимо сложным и запутанным выражениям. Математика в таких случаях напоминает автомат, в котором вместо колес и поршней работают правила логики. Она получает от нас информацию — факты и соотношения из эксперимента и из нашей головы, схемы, которые подлежат проверке, а потом перемалывает все это и подает в новой форме. Хотя в ее изделие не обязательно входят все заложенные материалы, но, как положено настоящему автомату, она никогда не выдает того, чего не было заложено вначале. Создать науки о реальном мире машина никакими ухищрениями не сможет.

Математика — верный слуга

Помимо обычных услуг, математика может творить в науке поистине чудеса. Как маленький кудесник, она может сотворить нечто новое для дальнейшего использования. Допустим, например, что падающее тело обладает



Фиг. 124.

постоянным ускорением $9,8 \text{ м/сек}^2$ и что любое движение, приданное ему вначале, попросту складывается с ускоренным движением. Тогда математическая машина возьмет ваше экспериментальное открытие, величину g и даст вам соотношение $s=v_0t+\frac{1}{2}(9,8)t^2$. А теперь допустим, что в ваших исследованиях никогда не было тел, брошенных вверх, и вы никогда не видели поднимающегося и падающего по параболе мяча. Математическая машина, которую не му-

¹⁾ Гл. 1 («Земное тяготение») входит в т. 1 настоящего издания.

щают подобные обстоятельства, даст вам ответ, как будто никаких ограничений нет и в помине. Так, чтобы посмотреть, как выглядит бросок вверх, v_0 в формуле надо придать отрицательное значение. Формула тотчас же расскажет вам невообразимую историю. Камень — скажет она — летел бы все медленнее и медленнее вверх, достиг бы высшей точки, а затем начал бы все быстрее и быстрее падать вниз. Но здесь вовсе не блестящая догадка, а обычное бесстрастное утверждение. В свое оправдание машина сказала бы: «Вы не сообщили мне, что v_0 должно быть направлено вниз. Я не знаю, верно ли новое предсказание. Единственное, что я могу сказать, что *ЕСЛИ бы движение вверх подчинялось правилам, которые мне задали для движения вниз, ТО брошенный вверх мяч поднимался бы, затем останавливался и начинал бы падать вниз*». Блестящее предположение о том, что это основное правило может быть общим, сделал не кто иной, как мы сами. Именно мы приветствовали такую подсказку машине, а затем проверили все ¹⁾. В качестве другого примера математики летящего снаряда рассмотрим уже встречавшуюся нам ранее задачу с двумя ответами.

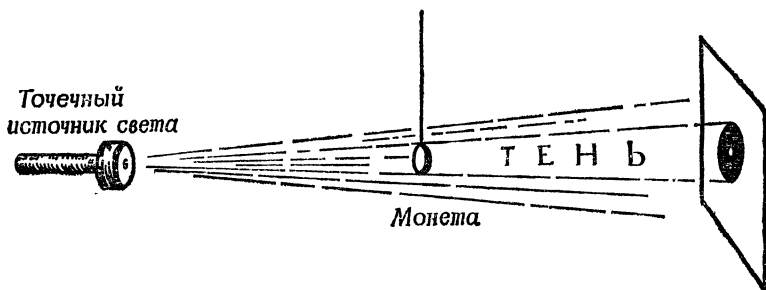
Задача 1

В птицу, сидящую на дереве на высоте 15 м, бросили вертикально вверх камень с начальной скоростью 20 м/сек. Через сколько секунд после броска камень попадет в нее? ($g \approx 10$ м/сек).

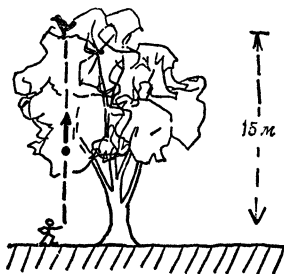
Ответ: 1 или 3 сек.

Этот ответ характеризует алгебру как очень честного, но довольно глупого слугу. Получилось два ответа, как собственно и должно быть для задачи, предложенной машине. Камень может попасть в птицу, когда летит вверх (через 1 сек) и когда падает вниз (через 3 сек). Если вы упрекнете машину за второй ответ, она будет оправдываться так: «Но вы же ничего не сказали о

¹⁾ Это простенький пример, выбранный из области хорошо знакомой вам физики; к сожалению, он настолько прост, что ответ уже был известен вам до того, как машина выдала его. Но есть много случаев, когда машина может выдать совершенно неожиданные утверждения и заставляет нас проверять их на опыте. Например, математическое исследование по волновой теории света говорит, что, когда диск отбрасывает в пучке света тень, в середине тени будет маленькое яркое пятнышко света (как если бы в каждой монете была дырочка).



том, что камень должен *попадать* в птицу и, кроме того, что он должен *попасть* в нее, когда будет лететь *вверх*. Я только вычислила, *через какое время камень будет на высоте 15 м над землей, а таких времен два*. Вернувшись назад, вы увидите, что совершенно не отразили в математике контакт между камнем и птицей и ничего не сказали о направлении движения камня в этот момент. То, что инструкция неполная, — *наша вина*, а то, что машина вежливо дала нам все возможные в рамках инструкции ответы, — *делает ей честь*,



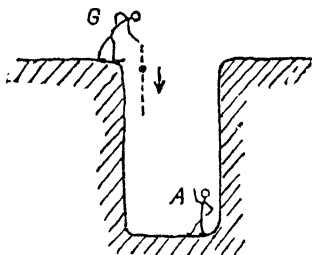
Фиг. 126. К задаче 1,

Если в каком-нибудь ответе на задачу получаются 3 или $2\frac{1}{4}$ коровы, мы вправе отбросить второй ответ, но вы сами виноваты, что не сообщили математической машине некие важные сведения о коровах. В физических задачах, где возникает несколько ответов, мы обычно без особого смысла отбрасываем некоторые из них. Все эти ответы могут быть совершенно правильными, если же некоторые из них слишком уж странные, то, признав их, мы можем прийти к новым выводам. Если вы вспомните задачу 15 приложения II к гл. 1¹⁾, то увидите, что означает второй ответ.

А вот еще задача того же типа.

Задача 2

Человек бросает в колодец глубиной 30 м камень, который начинает падать вниз со скоростью 5 м/сек. Когда он достигнет дна?



Фиг. 127. К задаче 2,

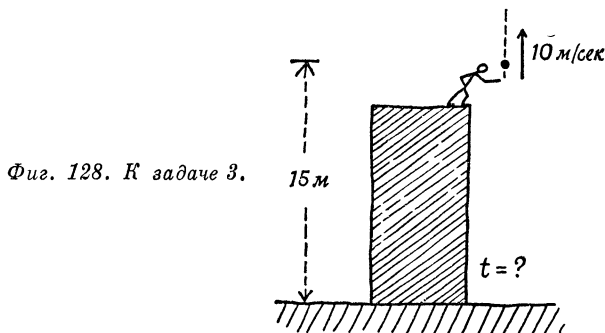
Припишем исходным данным подходящие знаки $+$ и $-$, подставим их в подходящее выражение для свободного падения и решим уравнение. Получаются два ответа: один — разумный со знаком $+$ («правильный» ответ), а другой с отрицательным знаком. Но так ли уж глуп отрицательный ответ?

¹⁾ См. т. 1, стр. 75.

Время, равное -3 сек, просто означает: «За 3 сек до того, как были пущены часы». Машине не было сказано о том, что камень брошен вниз человеком. Ей только сообщили, что в нулевой момент, когда были пущены часы, камень двигался вниз со скоростью 5 м/сек, а после этого падал свободно. Камень в нулевой момент времени мог просто выскользнуть из рук. Он мог быть брошен задолго до этого вторым человеком со дна колодца — предположим, он швырнул его вверх с достаточной силой, чтобы камень получил нужную скорость в нулевой момент. Таким образом, хотя наша теория говорит: «Джордж, стоя на краю колодца, бросил вниз камень ...», ответ -3 сек свидетельствует совсем о другой истории: «Альфред, стоя на дне колодца, сильно бросил камень вверх. Камень вылетел из колодца с уменьшающейся скоростью, достиг высшей точки и начал падать с возрастающей скоростью, пролетев мимо Джорджа через 3 сек после того, как его бросил Альфред. Джордж не успел поймать камень (в момент $t=0$), так что тот пролетел мимо него со скоростью 5 м/сек и снова упал на дно колодца». Согласно математике, камень достигнет дна через 1 сек после того, как его выпустит Джордж из рук, или же он мог бы начать движение со дна за 3 сек до того, как пролетит мимо Джорджа. Вернемся к задаче 15 приложения 11 гл. 1 и попытаемся пояснить полученные там два ответа.

Задача 3

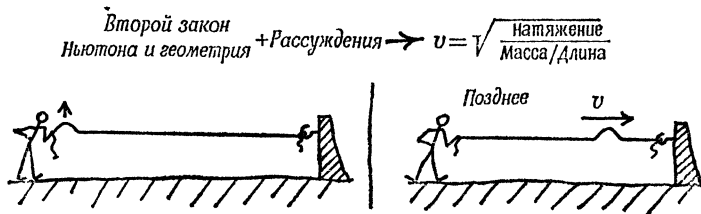
Человек, стоящий на вершине башни высотой 15 м, бросает вверх камень со скоростью 10 м/сек. Какое время понадобится камню, чтобы достичь земной поверхности?



В этой задаче математика ведет себя как исключительно честный слуга, совсем так, как честный мальчик из историй «Панаши Брауна» Дж. Честертона. Посыльный мальчик принес в глухую деревушку одному скряге телеграмму. По ошибке скряга вместо $\frac{1}{3}$ пенса (самой мелкой английской монеты из светлой бронзы) дал мальчику «на чай» золотой фунт. Как же поступил мальчик, когда обнаружил ошибку? Забрал золотой, бессовестно воспользовавшись ошибкой? С притворной добросовестностью принес ее назад, надеясь, что скряга, растрогавшись, скажет: «Возьми его себе, малыш!»? Нет, он не сделал ни того, ни другого. Он просто принес сдачу — 19 шиллингов и $11\frac{3}{4}$ пенса точно. «Наконец-то я нашел честного человека!» — воскликнул восхищенный скряга и завещал мальчику все свое золото. И мальчик, со своей тупой честностью, так буквально понял волю скряги, что спял даже золотые коронки с его зубов.

Самое удивительное — это то, что наша машина может приготовить «новый продукт» в таком виде, который соответствует совершенно новой точке зрения. Взглядом гения ученый может увидеть в новом смутные очертания выдуманного ранее, достаточные для работы воображения и проверки. Если мы попытаемся обойтись без математики, то потеряем нечто большее, нежели ясный язык: возможность стенографической записи рассуждений и мощное орудие переработки информации. Мы лишимся также части научного воображения на более высоком уровне.

С помощью математики можно закодировать современную науку в столь ясной форме, что в ней будет легче обнаружить простоту, которую многие ищут



Фиг. 129. Распространение волны по веревке.

в науке. Это, однако, не грубая простота наподобие круговых орбит планет, а простота изобретенная, понятная только на языке самой математики. Представим, например, что, уцепив конец натянутой веревки, мы создали на ней горб (фиг. 129). Воспользовавшись вторым законом Ньютона, мы можем закодировать поведение горба в сложной математической форме. И совершенно неожиданно здесь явно проступит «математическое клеймо» волнового движения¹⁾. Математика предсказывает, что эта волна будет распространяться, и говорит, как, зная натяжение и массу веревки, вычислить скорость волны.

Еще один пример. Сто лет назад Максвелл с помощью математики свел воедино экспериментальные законы электромагнетизма и записал их в про-

¹⁾ Волновое уравнение приводится к характерному виду

$$\nabla^2 V = \frac{1}{c^2} \frac{d^2 V}{dt^2};$$

оно описывает *любую* волну, распространяющуюся со скоростью c . (Если вы знакомы с дифференциальным исчислением, попросите кого-нибудь из физиков показать вам этот замечательный раздел математической физики.) Это уравнение связывает распространение в пространстве со скоростью изменения во времени. Для величины, убывающей обратно пропорционально квадрату расстояния, $\nabla^2 V$ было бы нулем, а здесь оно равно величине, напоминающей ускорение. Для электромагнетизма величину $d^2 V/dt^2$ можно связать с излучением волн при ускорении электронов. О смысле $\nabla^2 V = 0$ см. гл. 33 («Электростатика. Электрические заряды и поля», входит в т. 3 настоящего издания). Оно эквивалентно соотношению I в таблице на стр. 589, т. е. закону обратных квадратов.

стой форме. Прежде всего он избавился от деталей формы и размеров аппаратуры, как мы избавляемся от формы и размеров образца, вычисляя плотность металла по его весу и размерам. Удалив таким образом «граничные условия», Максвелл получил законы электричества, свойственные любой системе при любых обстоятельствах, как плотность свойственна любым образцам данного металла. Дифференциальное исчисление придало его законам окончательную форму, называемую дифференциальными уравнениями. Взгляните на них, пока не займаться о понимании терминологии.

Допустим, что в момент времени t движущиеся либо покоящиеся электрические заряды и магниты породили соответствующие поля: электрическое с напряженностью E (E — вектор с компонентами E_x, E_y, E_z) и магнитное поле H (с компонентами H_x, H_y, H_z). Тогда *в пустом пространстве* экспериментальные законы, известные уже сто лет, будут описываться приведенными соотношениями.

Уравнения Максвелла (неполные)

I	II
$\frac{dE_x}{dx} + \frac{dE_y}{dy} + \frac{dE_z}{dz} = 0$	$\frac{dH_x}{dx} + \frac{dH_y}{dy} + \frac{dH_z}{dz} = 0$
III	IV
$\left(\frac{dE_z}{dy} - \frac{dE_y}{dz} \right) = K_H \frac{dH_x}{dt}$	$-\left(\frac{dH_z}{dy} - \frac{dH_y}{dz} \right) = 0$
$\left(\frac{dE_x}{dz} - \frac{dE_z}{dx} \right) = K_H \frac{dH_y}{dt}$	$-\left(\frac{dH_x}{dz} - \frac{dH_z}{dx} \right) = 0$
$\left(\frac{dE_y}{dx} - \frac{dE_x}{dy} \right) = K_H \frac{dH_z}{dt}$	$-\left(\frac{dH_y}{dx} - \frac{dH_x}{dy} \right) = 0$

Постоянная K_H относится к магнитным полям. Она появляется в выражении для силы, действующей со стороны магнитного поля на электрический ток. (См. также гл. 37 «Магнитные силы», т. 3 настоящего издания.) Существует соответствующая постоянная для электрического поля K_E , которая появляется в законе Кулона (см. гл. 33 «Электростатика. Электрические заряды и поля», т. 3 настоящего издания).

Посмотрите на колонку IV и сравните ее с колонкой III. Уравнения IV кажутся неполными, они портят общую симметрию ¹⁾.

Максвелл обнаружил этот дефект и исправил его, выдумав дополнительный ток в пустоте — «привидение», которое до тех пор даже никому и не снилось, но впоследствии ток этот был обнаружен экспериментально. А как бы вы изменили уравнение IV, чтобы сделать его симметричным уравнениям III, если бы вам сказали, что часть уравнения пропущена (она была неизвестна еще в то время)? Попробуйте.

Такое добавление не было ни счастливой догадкой, ни вдохновением свыше. Для Максвелла, отлично знавшего состояние науки, оно казалось *обязательным*, неизбежным расширением симметрии. В этом разница между развитием науки знающим специалистом и стихийным изобретательством энтузиаста-любителя.

Сделав свое фантастическое в то время добавление, Максвелл смог заложить всю связку уравнений в математический «автомат». Оттуда вышло удивительное уравнение знакомого вида — волновое уравнение, аналогичное тому, которое получилось для горба на веревке. Это новое уравнение утверждало, что изменяющиеся электрические и магнитные поля должны распространяться в виде волн со скоростью $v=1/\sqrt{K_H K_E}$, где K_H — постоянная, характерная для магнитных эффектов, создаваемых движущимися зарядами, а K_E — соответствующая электростатическая постоянная, введенная Максвеллом при усовершенствовании уравнений ²⁾. (K_E входит в закон обратных квадратов для сил, действующих между двумя электрическими зарядами.)

Необычный вывод этого вы найдете в конце гл. 37 ³⁾.

К удовольствию Максвелла и удивлению его противников вычисленное значение v совпадало со скоростью света, который, как считалось в то время, представляет какие-то волны. Все сходилось к тому, что свет мог быть одним из видов предсказанных Максвеллом электромагнитных волн.

Это произошло за много лет до того, как предсказание Максвелла было проверено путем непосредственной генерации электромагнитных волн электрическими токами. Работа Максвелла была одним из величайших достижений физики. А ныне пришедшие ей на смену столь же смелые гипотезы создают основы физики сегодняшнего дня.

Одним из величайших вкладов математики в физику явилась теория относительности, которую можно считать разделом и физики, и математики;

¹⁾ Для дополнения уравнения IV вам потребуется ввести постоянную K_E , соответствующую K_H в уравнениях III. Знак минус в уравнении IV не необходим. Если уравнение IV дополнить, это несколько испортит симметрию, но этого требуют экспериментальные факты и сохранение энергии. Без этого не существовали бы радиоволны.

²⁾ В нашем курсе используются другие обозначения (см. гл. 33 и 37, т. 3). Силу между электрическими зарядами мы запишем в виде $F=B(Q_1 Q_2)/d^2$. Сравнение с формулой Максвелла показывает, что наше B равно $1/K_E$. Магнитную же силу между двумя отрезками проводов, по которым проходит ток, мы запишем в виде $F=B'(C_1 L_1)(C_2 L_2)/d^2$, а наше B' равно K_H . Предсказание Максвелла $v=1/\sqrt{K_E K_H}$ в наших обозначениях выглядит так: $v=1/\sqrt{(1/B) \cdot B'}=\sqrt{B'/B}$. Измерив B и B' , можно предсказать скорость распространения электромагнитных волн. Арифметика здесь простая. Попробуйте проделать вычисления и сравнить результат с измеренной скоростью света $3,0 \cdot 10^8$ м/сек. (В наших единицах $B=9,00 \cdot 10^9$, а $B'=10^{-7}$.)

³⁾ Гл. 37 («Магнитные силы») входит в т. 3 настоящего издания.

для ее понимания требуется хорошее знание как математики, так и физики. Сейчас мы обратимся к «Специальной теории относительности» Эйнштейна, потом снова вернемся к математике как языку науки.

Теория относительности

Теория относительности привела к видоизменению механики и ломке старых научных представлений. Она возникла из простого вопроса: «Какова скорость нашего движения в пространстве?» Попытки экспериментально ответить на этот вопрос создали затруднения, которые заставили ученых думать о пересмотре существовавших представлений. В результате подобных переоценок возникла теория относительности — блестящий пример приложения математики и методологии к нашим взглядам на пространство, время и движение. Теория относительности — это раздел математики. Поэтому популярное изложение этой теории без математики почти наверняка обречено на неудачу. Чтобы понять теорию относительности, вы должны либо проследить за всеми выкладками по обычным учебникам, либо, как это сделано в данной книге, разобраться в исходных фактах и окончательных результатах, приняв на веру все, что касается работы самой «машины» математики.

Что можно сказать о пространстве? Где находится начало отсчета фиксированной системы и с какой скоростью мы движемся в пространстве? Сейчас точка зрения Коперника кажется нам удобной и мы рисуем в воображении вращающуюся Землю, которая несется по своей орбите вокруг Солнца со скоростью около 120 000 км/час. Солнечная система как целое мчится к созвездию Геркулеса со скоростью 180 000 км/час, тогда как вся Галактика...

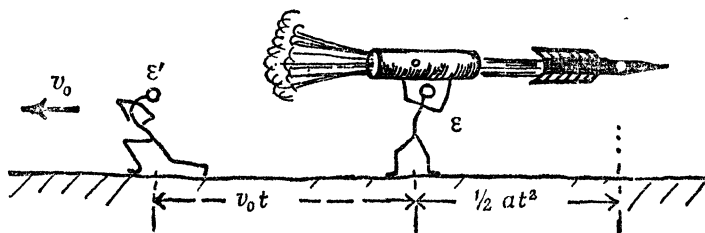
Должно быть, мы летим по огромной энциклопиде, не ведая об этом. Не ведая, ибо, как заметил Галилей, механика движения, а именно столкновений, полета снарядов и т. д., будет одной и той же как в покоящейся, так и в равномерно движущейся лаборатории ¹⁾. Сам Галилей приводил в пример мысленные эксперименты с человеком, который на идущем по курсу корабле бросает камни с мачты. В гл. 2³⁾ мы иллюстрировали эту «галилееву относительность» мысленными экспериментами в движущемся поезде. Допустим, что один поезд проходит мимо другого с постоянной скоростью и без всяких толчков, причем все окутано таким туманом, что вокруг ничего не видно. Могут ли пассажиры определить, какой из поездов движется? Могут ли им помочь эксперименты по механике? Пассажиры могут наблюдать только *относительное* движение. Хотя все правила сложения векторов и законы движения выработаны в движущихся «земных» лабораториях, они тем не менее не обнаруживают никакого влияния этого движения.

¹⁾ Хотя при движении по орбите скорость Земли меняется, мы считаем ее постоянной на протяжении короткого времени эксперимента. На самом деле постоянно будет точным, так как любое изменение скорости Земли полностью компенсируется силой гравитационного притяжения Солнца, вызывающего эти изменения. На Земле в целом (например, в ее центре) мы не можем заметить никакого эффекта и видим *разностный* эффект в разных точках Земли, например приливы. Собственное вращение Земли приводит к заметным эффектам; маятник Фуко изменяет плоскость своего качания, а ускорение g на экваторе и полюсе оказывается разным и т. п. Однако там, где эти различия существенны, их можно учесть.

²⁾ Гл. 2 («Полет снарядов. Геометрическое сложение: векторы») входит в т. 1 настоящего издания.

Мы называем *инерциальной* любую систему отсчета или лабораторию, в которой справедливы законы Ньютона; предоставленные самим себе тела движутся по прямой с постоянной скоростью или остаются в покое, а сила сообщает пропорциональное ей ускорение. Мы установили, что любая система, движущаяся с постоянной скоростью относительно инерциальной, тоже будет инерциальна — в ней справедливы законы Ньютона. В последующих рассуждениях о галилеевой и эйнштейновской относительности мы *предполагаем*, что рассматриваем инерциальные системы подобно покоящейся относительно Земли. В обсуждениях общей теории относительности мы коснемся и других систем, в частности тех, которые ускоряются.

Природа не обесценила нас строго инерциальной системой. Вращающаяся Земля в строгом смысле — не инерциальная система (ибо ее вращение вызы-



Фиг. 130.

вает центростремительное ускорение); если бы нам удалось найти одну идеальную систему, то принцип относительности гарантировал бы любое число других инерциальных систем. Любая система, движущаяся с постоянной скоростью по отношению к нашей первой, была бы столь же хорошей инерциальной системой; законы Ньютона, справедливые по определению в первоначальной системе, были бы справедливы и во всех остальных. Когда мы проводим опыты по механике и обнаруживаем, что законы Ньютона строго выполняются, то с точки зрения теории относительности просто демонстрируем, что наша первоначальная лаборатория была практически инерциальной системой. Напротив, любые эксперименты, демонстрирующие вращение Земли, показывают несовершенство нашего выбора инерциальной системы. Однако, сказав «Земля вращается», мы представляем себе идеальную систему, в которой законы Ньютона выполняются совершенно точно.

Теория относительности Галилея содержится в наших формулах. Когда для движущейся по горизонтали с ускорением ракеты мы пишем $s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$, то это означает «запустить ракету со скоростью v_0 и это скажется в качестве простого добавления слагаемого $v_0 t$ к пройденному расстоянию».

То же самое можно сформулировать следующими словами: «Экспериментатор ε запускает ракету из состояния покоя и наблюдает движение по закону $s = \frac{1}{2} a t^2$. Другой экспериментатор ε', бегущий со скоростью v_0 , увидит движение по закону $s' = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$. Он должен добавить $v_0 t$ вследствие своего собственного движения» (фиг. 130).

Мы говорим, что равномерное и ускоренное движения не мешают друг другу, а просто складываются.

Наблюдатели ε и ε' сделали бы следующие заключения о расстоянии, пройденном за время t :

НАБЛЮДАТЕЛЬ ε

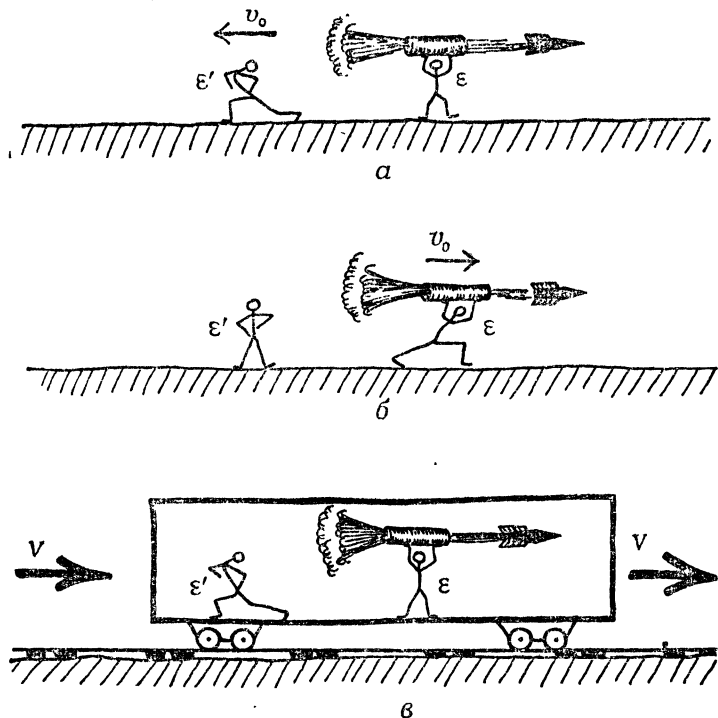
$$s = \frac{1}{2}at^2$$

НАБЛЮДАТЕЛЬ ε'

$$s' = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$$

Оба вывода говорят о том, что ракета движется с постоянным ускорением¹⁾.

Оба заключения говорят, что в начальный момент $t=0$ ракета находилась в начале координат.



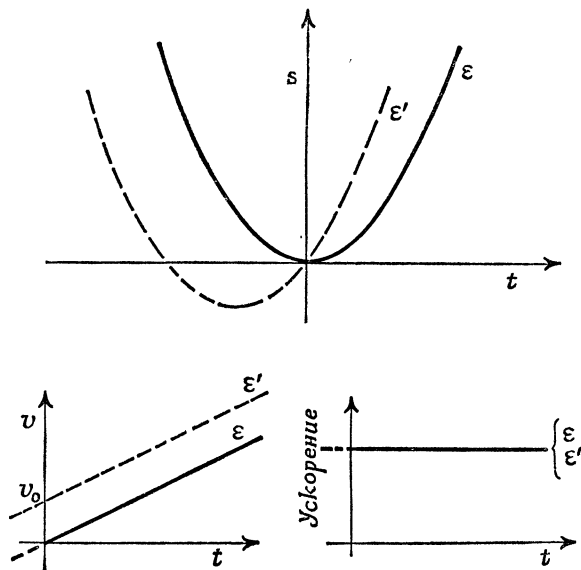
Фиг. 131.

Первое заключение говорит, что наблюдатель ε видит, будто ракета начала движение из состояния покоя. В момент пуска часов $t=0$ ракета по отношению к наблюдателю не обладала скоростью. В этот момент ракета двигалась вместе

¹⁾ Первое утверждение проще, ибо оно принадлежит наблюдателю, который запустил ракету в момент $t=0$ из состояния покоя.

с ним, если сам он двигался (так что *ему* она казалась покоящейся), а он дал ей возможность двигаться с ускорением.

Различие этих выводов свидетельствует, что относительная скорость наблюдателей ϵ и ϵ' равна v_0 . Однако никакой информации об абсолютном движении здесь не содержится. Наблюдатель ϵ' может стоять на месте, в этом случае наблюдатель ϵ бежит *назад* с постоянной скоростью v_0 (запуская в момент $t=0$ на бегу ракету, фиг. 131, б). А может быть, оба наблюдателя, и ϵ и ϵ' , находятся в поезде, мчащемся с огромной скоростью (фиг. 131, в), но и тогда ϵ движется со скоростью v_0 относительно ϵ' . В любом случае v_0 будет относительной скоростью наблюдателей и никакой анализ их измерений не может сказать нам (или им), кто из них «действительно» движется.



Фиг. 132.

Добавка $v_0 t$ только *сдвигает* график зависимости s от t , но не влияет на *ускорение и силы*. Следовательно, на вопрос: «С какой скоростью движемся мы в пространстве?», простая механика отвечает: «Никакие эксперименты с весами, пружинами и силами... не могут выявить нашей *скорости*. Ускорение дает о себе знать, но постоянную скорость мы не чувствуем». Мы можем измерять только *относительную скорость*, т. е. скорость по отношению к другим телам и системам отсчета.

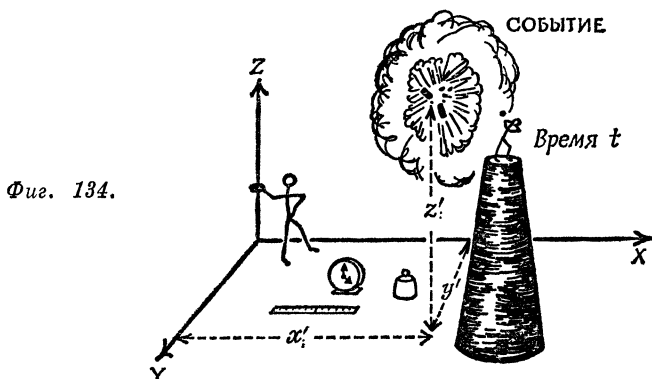
Тем не менее мы все же рассуждаем так, как будто бы *существует* абсолютное движение, как будто бы мимо нас проносятся «верстовые столбы» пространства, но как их заметить? Однако прежде чем перейти к этому вопросу, где нас ждет большее разочарование, мы запишем правила относительного движения в простой алгебраической форме.



Фиг. 133. Обнаружение одинаковых механических законов.

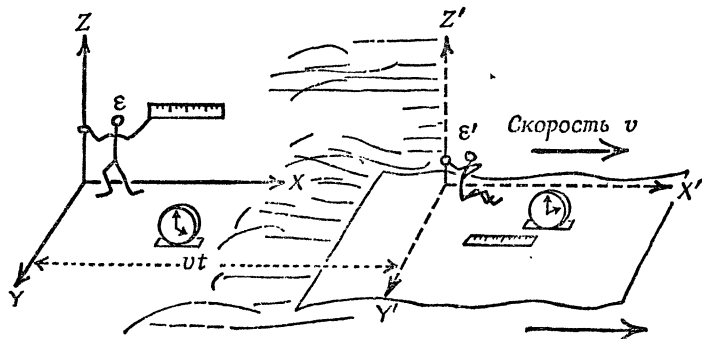
Галилеево преобразование координат

Сравнение результатов двух наблюдателей можно провести просто и в общем виде. Допустим, наблюдатель ϵ описывает события в своей лабора-



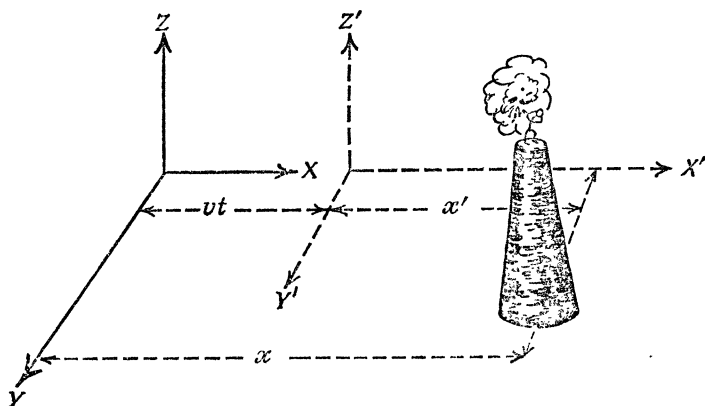
рии. Другой наблюдатель ϵ' , пролетающий мимо лаборатории с постоянной скоростью v , описывает те же события так, как видит их он. Оба наблюдателя ϵ и ϵ' приготовили для измерения одинаковые часы и метры и с каждым из

них связаны оси X , Y и Z . Для удобства наблюдатели запускают свои часы ($t=0$, $t'=0$) в тот момент, когда находятся рядом. В тот же момент совпадают



Фиг. 135.

начала их систем и оси координат. Допустим, что, по мнению ϵ , событие произошло в момент t в точке (x, y, z) по отношению к своим осям¹⁾. Наблюдатель ϵ' регистрирует то же событие с помощью *своих* приборов: оно происходит в момент t' и в точке (x', y', z') по отношению к движущимся вместе с ним осям координат. Как сравнить эти два результата? Здравый смысл говорит нам, что



Фиг. 136.

время для обоих наблюдателей будет одним и тем же, так что $t=t'$. Пусть относительная скорость наблюдателей равна $v=м/сек$ и направлена вдоль оси X .

¹⁾ Например, он в момент $t=0$ выпускает пулю, летящую со скоростью 1000 м/сек в направлении оси X . Тогда попадание пули в мишень, отстоящую в 3 м, можно записать как $x=3 м$, $y=0$, $z=0$, $t=0,003 сек$.

Тогда координаты y и z для них будут также одинаковы: $y'=y$, а $z'=z$. Но поскольку наблюдатель ϵ' вместе со своей системой координат переместился за время t от наблюдателя ϵ на vt метров, его координаты x' будут на vt метров меньше, так что каждое x' должно быть равно $x-vt$. Итак,

$$x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t.$$

Эти соотношения, связывающие результаты наблюдений ϵ' и ϵ , называются *преобразованиями Галилея*.

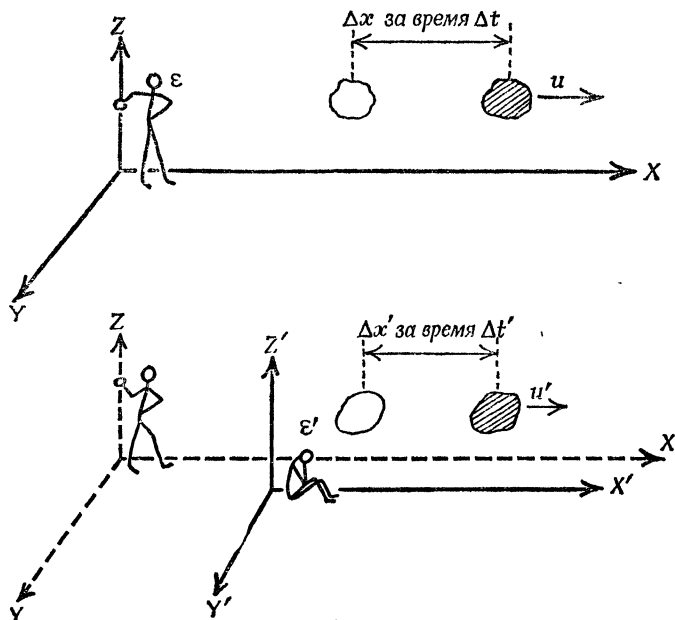
Обратные преобразования, связывающие наблюдения ϵ и ϵ' , имеют вид

$$x = x' + vt, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = t'.$$

Оба типа преобразований равноправны для обоих наблюдателей и указывают просто на наличие *относительной* скорости наблюдателей $+v$ в случае $\epsilon' \rightarrow \epsilon$ и $-v$ в случае $\epsilon \rightarrow \epsilon'$. Эта *алгебраическая* запись отражает наш обыденный взгляд на пространство и время.

Скорость движущегося тела

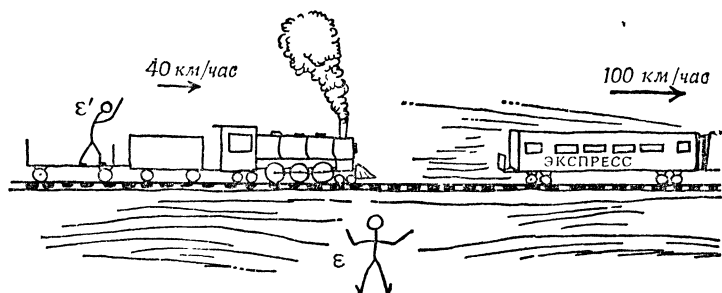
Если наблюдатель ϵ видит движущееся вдоль оси X тело и измеряет его скорость u отношением $\Delta x / \Delta t$, то, по мнению ϵ' , то же тело движется со ско-



Фиг. 137.

ростью u' , равной $\Delta x' / \Delta t'$. Использование алгебры и преобразований Галилея показывает, что $u' = u - v$. (Чтобы получить это соотношение в случае постоянных скоростей, надо просто разделить $x' = x - vt$ на t .) Предположим, например,

что наблюдатель ϵ стоит у железнодорожного полотна и видит экспресс, движущийся со скоростью $u=100$ км/час. Другой наблюдатель ϵ' едет на то



Фиг. 138.

варном поезде со скоростью 40 км/час в том же направлении (фиг. 138). Тогда экспресс с точки зрения ϵ' будет двигаться со скоростью

$$u' = u - v = 100 - 40 = 60 \text{ км/час.}$$

Если наблюдатель ϵ' движется в противоположную сторону, как при лобовом соударении, то $v = -40$ км/час, и ϵ' видит экспресс приближающимся со скоростью

$$u' = 100 - (-40) = 140 \text{ км/час.}$$

Это обычный способ сложения и вычитания скоростей. Он кажется с точки зрения «здравого смысла» единственно правильным, и в первых главах (т. 1) мы принимали его как нечто непреложное. Тем не менее окажется, что при очень больших скоростях его необходимо модифицировать.

Абсолютное движение?

Если мы обнаружим, что лаборатория находится в движущемся поезде, то сможем учесть скорость движения поезда и отнести результаты всех наших опытов к Земле. Обнаружив движение Земли, мы можем поместить систему координат на Солнце, затем на звезды, затем в центр тяжести всех звезд. Но если эти перемены не влияют на наше понимание механики, имеют ли они смысл? Разумно ли так беспокоиться об абсолютной неподвижной системе? Ответить заставляет любопытство. «Да. Если мы движемся в космическом пространстве, то было бы интересно знать, с какой скоростью». Если этого не могут сказать механические опыты, то, может быть, могут прояснить опыты с электричеством? Для неподвижного наблюдателя электромагнитные явления целиком содержатся в уравнениях Максвелла. Посмотрим, что обнаружит движущийся наблюдатель при переходе от x к x' в соответствии с преобразованиями Галилея. Уравнения Максвелла тогда принимают более сложную форму. Доверяющий этим преобразованиям экспериментатор сможет определить, что на самом деле движется — он или его приборы. Абсолютное движение появилось бы в изменении формы законов теории электричества. Простейший способ найти эти изменения — воспользоваться распространением световых волн — электромагнитных полей, предсказанных уравнениями Максвелла.

Нашу скорость в пространстве можно найти, измеряя скорость распространения вспышек света. Подобные эксперименты пытались проделать еще семьдесят пять лет назад. Получился неожиданный результат. Оказалось, что не удается наблюдать никаких эффектов движения. Затем появилось множество попыток объяснить этот результат. Фитцджеральд в Англии предположил, что где бы в пространстве ни двигался предмет, он должен сокращаться в направлении движения, причем во сколько раз он сокращается — зависит только от скорости движения. При определенных условиях сокращение размеров приборов, регистрирующих световые сигналы, не позволило бы обнаружить движение в пространстве. Это странное сокращение, заставляющее сжиматься даже измерительные линейки, как и все находящееся в движении, казалось слишком невероятным и поэтому было встречено неодобрительно. К тому же не было дано механизма сокращения. Впоследствии голландский физик Лоренц (и Лармор в Англии) разработал последовательное «объяснение» механизма сокращения.

Преобразования Лоренца

Лоренц создал электронную теорию вещества, согласно которой атомы содержат электрические заряды, которые, двигаясь, излучают световые волны. Произошедшее вскоре после этого открытие электронов подкрепило его соображения, и было естественно, что Лоренц попытался объяснить неожиданный результат с точки зрения своей теории. Он обнаружил, что если потребовать неизменности уравнений Максвелла при движении электронов и атомов приборов, то длины в направлении движения при переходе от x к x' должны сокращаться в

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\text{СКОРОСТЬ НАБЛЮДАТЕЛЯ}}{\text{СКОРОСТЬ СВЕТА}} \right)^2}}$$

раз.

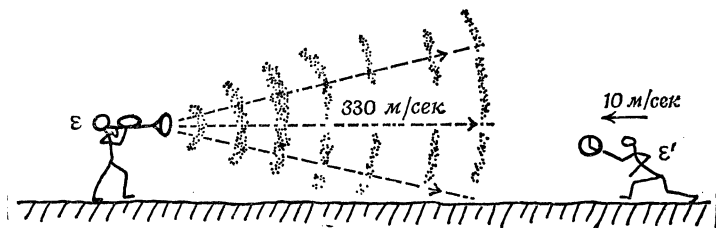
Лоренц показал, что это сокращение (такое же, как у Фитцджеральда) приборов в точности «компенсирует» любой эффект движения в пространстве и таким образом объясняет экспериментальные результаты. Но, кроме того, он указал и причину сокращения. Он показал, как сокращение связано с электрическими силами в новой полученной им форме уравнений Максвелла.

Очень странно думать, что тела при движении незаметно сокращаются — незаметно, ибо мы сами сокращаемся. Однако это ничуть не хуже прежней ситуации, связанной с существованием необъяснимых эффектов, которые получались при галилеевых преобразованиях уравнений Максвелла. Наряду с x' преобразуется и t' ; кроме того, к t' пришлось добавить странное слагаемое. При применении таких преобразований уравнения Максвелла сохраняют простую форму для любого наблюдателя, движущегося с постоянной скоростью. Дальше вы увидите, как эти «преобразования Лоренца» были использованы в теории относительности, но сначала познакомьтесь со знаменитыми экспериментами с распространением световых сигналов.

Измерение скорости движения в пространстве

Уже сто лет назад было ясно, что свет представляет собой волны, которые с очень большой скоростью распространяются в стекле, воде, воздухе и даже в «пустом пространстве» от звезд до нас. Считалось, что это пространство за-

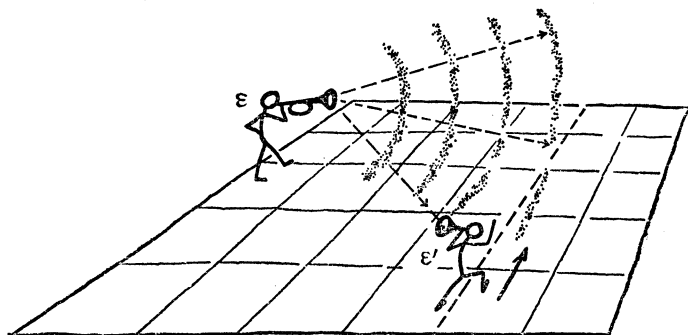
полнено «эфиром»¹⁾, который переносит световые волны так же, как воздух — звук. Сейчас мы знаем, что свет (и другие радиоволны) представляет распространяющиеся электрические и магнитные поля и нет необходимости ни в каком «эфире», но прежде чем подойти к этой простой точке зрения, ученые столкнулись с вопиющим противоречием.



Фиг. 139.

Эксперименты, призванные выяснить то, как быстро мы движемся через «эфир», дали удивительный результат: «никак!». Это напело противоречило опытам с распространением звуковых волн в воздухе.

Звуки в воздухе распространяются в виде волн. Звук трубы, например, передается молекулами воздуха с определенной скоростью *относительно самого воздуха*, которая всегда одинакова независимо от того, движется труба



Фиг. 140.

или нет. Но движущийся наблюдатель обнаруживает, что его скорость складывается со скоростью движения звуковых волн. Когда он бежит по направлению к трубе, звук проходит мимо него быстрее (фиг. 139). Он может определить свою скорость движения *относительно воздуха*, измеряя частоту проходящих мимо него звуковых сигналов.

Наблюдатель заметит и другой эффект, если он движется стороной, приложив к уху звукоулавливатель (фиг. 140). Направление звука будет постоян-

¹⁾ Так древнегреческие философы называли универсальное вещество, которое, по их мнению, заполняет все пространство за пределами атмосферы.

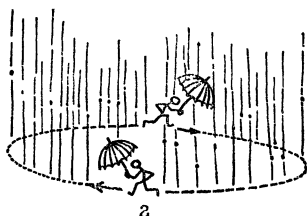
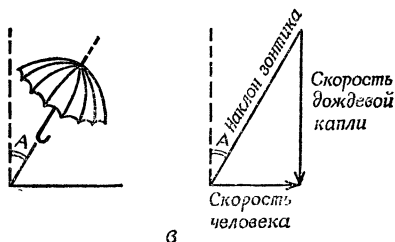
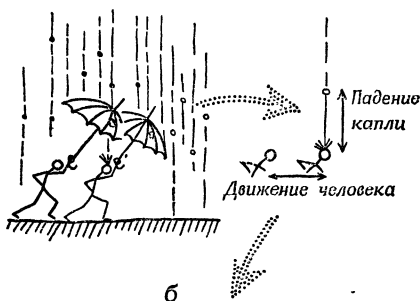
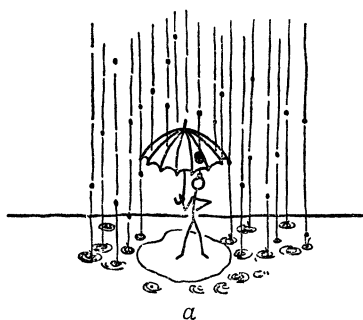
но изменяться. Если известна скорость звука, то наблюдатель может определить и свою скорость.

В любом случае измерения позволяют наблюдателю определить скорость *относительно воздуха*. Тот же эффект создает и ветер, избавляя нашего наблюдателя от беготни.

Подобные опыты со световыми волнами должны были выяснить нашу скорость относительно «эфира» — того, что было единственным символом абсолютного пространства. Опыты были проделаны, и результаты их оказались весьма многозначительными.

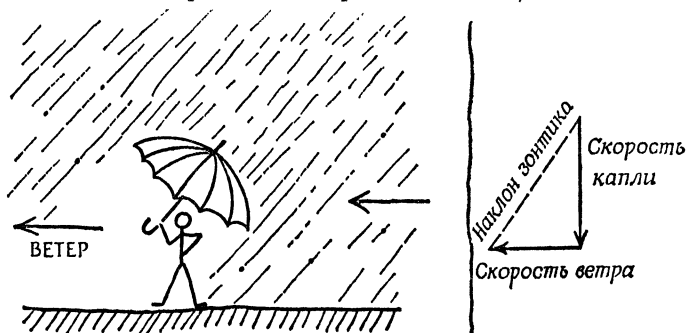
Аберрация звездного света

Вскоре после смерти Ньютона астроном Бредли обнаружил небольшое годовое колебание положения всех звезд, обусловленное движением Земли по орбите. Представьте себе, что свет от звезды над головой — это хлынувший (с большой скоростью) ливень. Если на таком отвесном дожде вы держите зонтик прямо, капли будут падать на него под прямым углом, а капля, проникшая через дырочку посередине, упадет прямо вам на голову (фиг. 141, а). А теперь припуститесь из всех сил бегом. Дождь будет казаться вам косым (фиг. 141, б). Чтоб защититься от него, придется наклонить зонтик под углом, полученным с помощью сложения векторов (фиг. 141, в). Капли, пролетевшие через щель, будут по-прежнему падать вам на голову. Если вы бегаєте по круговой орбите или взад-вперед по прямой линии, то должны наклонять зонтик так, чтобы он соответствовал направлению движения (фиг. 141, г).



Фиг. 141. «Аберрация» дождя.

Как раз это и обнаружил Бредли, когда пристально изучал в телескоп звезды¹⁾. Кажется, что звезды вблизи плоскости эклиптики отклоняются то туда, то сюда на небольшой угол, а звезды вблизи полюса описывают в течение года небольшие окружности. Следящий за звездами телескоп напоминает наклоненный зонтик. За шесть месяцев скорость Земли относительно Солнца меняет свое направление на противоположное, так что наклон телес-



Фиг. 142. «Аберрация» дождя при сильном ветре,

копа за это время тоже должен соответственно измениться. Из этого небольшого изменения Бредли определил скорость света. Она согласовалась с единственной в то время оценкой, полученной по наблюдениям за спутниками Юпитера в различных точках земной орбиты²⁾,

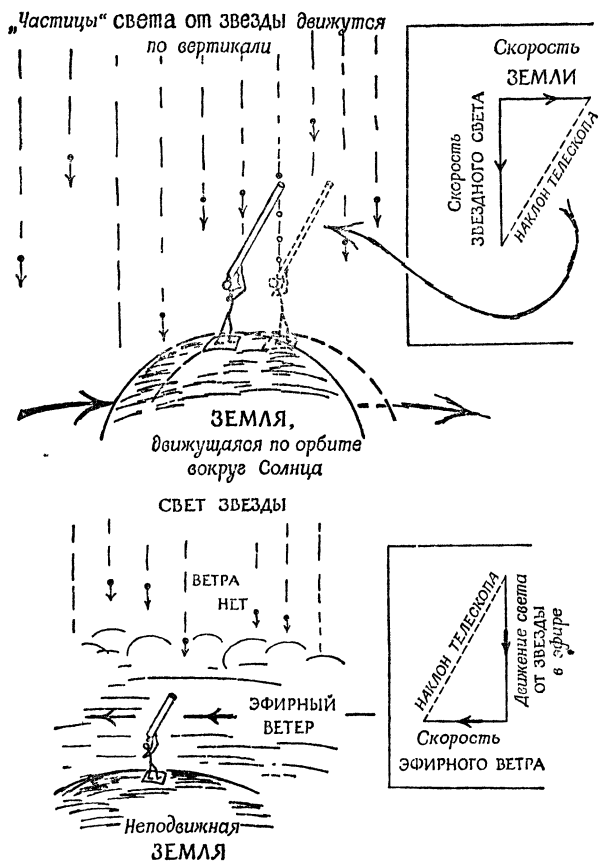
¹⁾ Эта аберрация в корне отличается от параллакса — кажущегося движения ближайших звезд на фоне удаленных. Аберрация тоже заставляет звезды двигаться, но она относится ко *всем* звездам и на порядок больше параллакса даже ближайших звезд. (Кроме того, аберрация звезды пропорциональна скорости Земли и отстает по фазе на три месяца от ее параллакса.)

²⁾ Это произошло задолго до успешных «земных» экспериментов (~1600): Галилей описал первую попытку определить время распространения вспышки сигнального фонаря между вершинами двух гор. Наблюдатель e_1 посылал вспышку наблюдателю e_2 , который, увидев ее, немедленно посылал сигнал e_1 . Пока e_2 не натренировался, они получали для света конечную скорость. Но по мере того как они совершенствовались свою технику, скорость вырастала все больше и больше, до «бесконечности» — скорость света слишком велика, чтобы можно было измерить ее таким способом.

(~1700): Ньютон знал только измерение света, проведенное Рёмером по спутникам Юпитера.

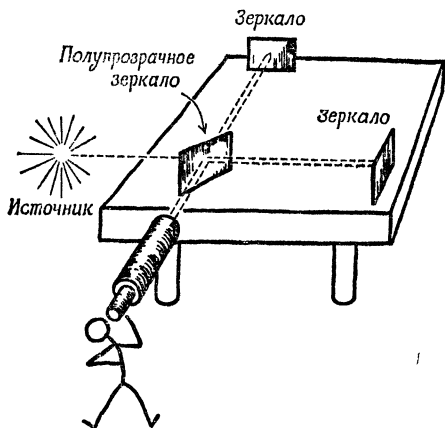
(1849): Успешный опыт Физо, в котором свет отражался удаленным зеркалом, а вращающееся зубчатое колесо пересекало луч, создавая вспышки и пропуская их при возвращении в следующий промежуток между зубцами. Его результат подтверждал астрономические наблюдения. Как этот, так и все последующие «земные» методы основывались на прерывании светового луча и сходны с методом измерения скорости пули или электронов.

Результат: скорость света равна 300 000 000 м/сек.



Фиг. 143. Абберация света звезд.

Чтобы капли падали на зонтик отвесно, вы должны наклонять его при беге или при ветре, если только ветер не несет воздух, а с ним и капли *вслед за вами*. (Если вы стоите под душем внутри мчащегося поезда, вам не придется наклонять зонтика.) Поэтому проведенные Бредли измерения аберрации го-

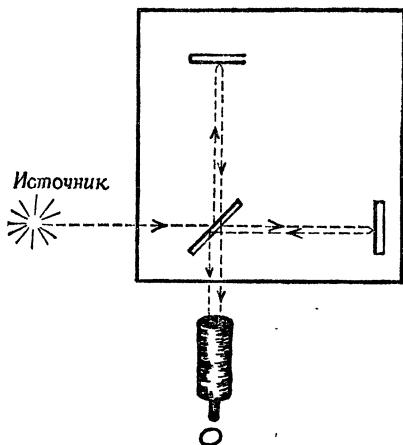


ворили, что при движении Земли по орбите она перемещается в «эфире» в различных направлениях в пространстве со скоростью 30 км/сек.

Общее движение Солнечной системы в направлении каких-либо звезд остается незамеченным, ибо это дает постоянное отклонение направления на звезды, а Бредли измерял сезонное изменение наклона.

Опыт Майкельсона — Морли

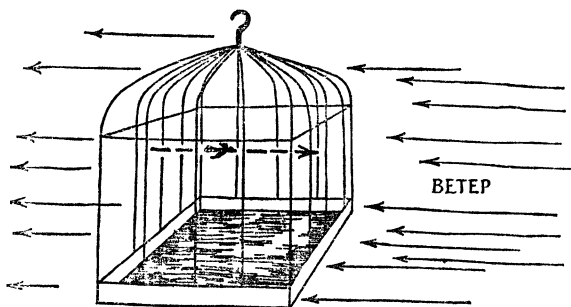
Семьдесят пять лет назад были задуманы новые эксперименты для обнаружения абсолютного движения. Одним из наиболее известных и решающих был эксперимент, выполненный Майкельсоном и Морли в Кливленде. Он явился одним из первых великих научных достижений Нового Света. В своем эксперименте Майкельсон и Морли заставили два луча света, идущие в разных направлениях, «шагать в ногу». Здесь не было движущегося наблюдателя и фиксированного источника, как в случае Бредли и звезд. Как источник,



Фиг. 144. Схематическое представление опыта Майкельсона—Морли.

так и наблюдатель перемещались в пространстве вместе с лабораторией, и экспериментаторы пытались обнаружить движение эфира, переносящего световые волны. Полупрозрачное зеркало расщепляло свет на два пучка, один из которых шел вертикально, а другой — горизонтально (фиг. 144). Зеркала поворачивали пучки назад, и они, вновь соединяясь, давали интер-

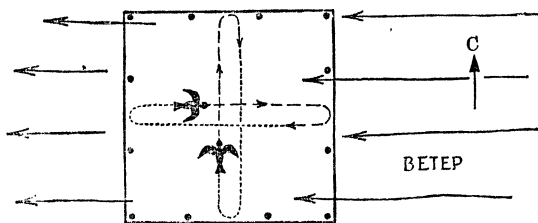
френционную картину. Малейшее изменение времени пролета одного луча по сравнению с другим смещало бы эту картину. Предположим теперь, что в какое-то время вся аппаратура движется вверх. Внешний наблюдатель увидел бы, что луч света отклоняется «эфирным» ветром вверх или вниз, причем наклон для каждого из путей будет один и тот же. В другое же время года Земля как целое движется горизонтально, поэтому горизонтальному лучу



Фиг. 145.

потребуется больше времени, чтобы пройти путь в оба конца, чем вертикальному.

В обычных курсах вы найдете описание этого эксперимента. С помощью алгебры показывается, что если вся лаборатория движется сквозь «эфир»,



Фиг. 146.

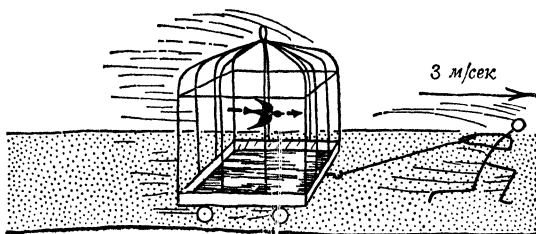
то свету понадобится больше времени на то, чтобы пройти вдоль потока и вернуться назад, нежели пройти поперек потока. Вы можете убедиться в этом на следующем примере. Пусть вместо света взад и вперед в клетке летает птица, а клетка движется относительно воздуха (фиг. 145 и 146).

Можно либо равномерно тащить клетку в стоячем воздухе, либо оставить клетку в покое и создать эквивалентный поток воздуха в противоположном направлении (фиг. 147). Остановимся на последнем варианте, но эту историю

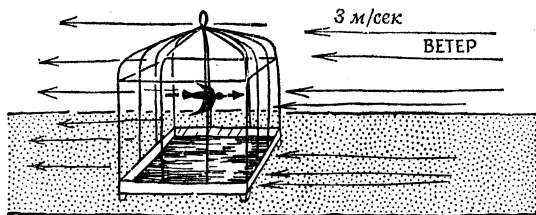
с тем же результатом можно пересказать и для движущейся клетки. Предположим, что скорость птицы относительно воздуха составляет 5 м/сек, клетка представляет собой квадрат 40 м × 40 м, а ветер дует со скоростью 3 м/сек. Чтобы пролететь от одного конца до другого и вернуться назад, птице требуется 10 сек + 10 сек ¹⁾, т. е. всего 20 сек. Но чтобы пролететь от одного конца до другого и вернуться назад, требуется

$$\frac{40 \text{ м}}{(5-3) \text{ м/сек}} + \frac{40 \text{ м}}{(5+3) \text{ м/сек}},$$

или 20 сек + 5 сек, т. е. большее время ²⁾. Посадите птицу в клетку наподобие только что описанной; время полета птицы поперек и вдоль клетки скажет вам, насколько быстро относительно воздуха движется клетка. Конечно,



или



Фиг. 147.

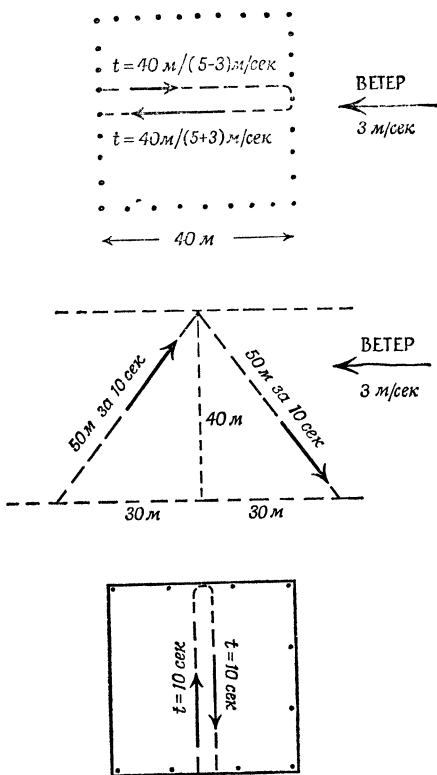
¹⁾ Для этого требуются некоторые геометрические размышления (фиг. 148). Чтобы пролететь 40 м поперек клетки, птица должна пролететь 50 м по гипотенузе, но потом за это время ее снесет на 30 м. Простейший ответ 8 + 8 сек дает слишком мало.

²⁾ Если вы еще не убеждены и чувствуете, что путь в оба конца должен усредниться, проделайте мысленный эксперимент с ветром, который дует быстрее, скажем 6 м/сек. Тогда птица вообще не сможет лететь против ветра и время будет бесконечным.

можно воспользоваться двумя птицами. Поверните клетку в другом направлении, и время пролета птиц скажет вам, в каком направлении движется клетка и с какой скоростью. Подобный же эксперимент со звуковыми волнами в лаборатории, движущейся относительно воздуха, дал бы вам скорость лаборатории. Пусть в одном углу комнаты стоит горнист и подает сигнал, тогда время возвращения эха от противоположных стен выявит общее движение лаборатории или наличие ветра. (Разумеется, если эта движущаяся лаборатория закрыта со всех сторон и увлекает находящийся в ней воздух с собой, эхо не обнаружит никакого движения.)

Соответствующие опыты со световыми сигналами трудны, но интерференционная картина крайне чувствительна ко времени прохождения. Когда Майкельсон и Морли поставили такой опыт, а Миллер повторил его, ответ получился удивительным: *никакого движения «эфира» нет*. Опыты повторялись при разных ориентациях и в разные времена года всегда с одним и тем же ответом: *«движения нет»*. Будь вы опытным ученым, вы бы сразу спросили: «А какова точность? Каковы ошибки?»

Ответ: «Они таковы, что позволили бы надежно определить скорость, равную $\frac{1}{4}$ скорости движения Земли вокруг Солнца, а в последних¹⁾ опытах — $\frac{1}{10}$ скорости Земли».



Фиг. 148. Геометрия полета.

Аберрация тем не менее указывала на движение «эфира», равное $\frac{10}{10}$ этой скорости. Добавились данные других опытов: оптических, электрических. Вновь и вновь получался все тот же «нулевой результат». Налицо было явное противоречие.

¹⁾ Последняя проверка (Таунс, 1958), проведенная с помощью микроволн в резонансной полости, дала нулевой результат, тогда как авторы могли заметить скорость, составляющую $\frac{1}{1000}$ орбитальной скорости Земли.

Попадающий в телескоп свет звезд
через 6 месяцев меняет свой наклон

Сравнение времени прохождения в оба
конца световых сигналов в двух пер-
пендикулярных направлениях;
дифракционная картина не меняется
при повороте прибора или смене вре-
мени года



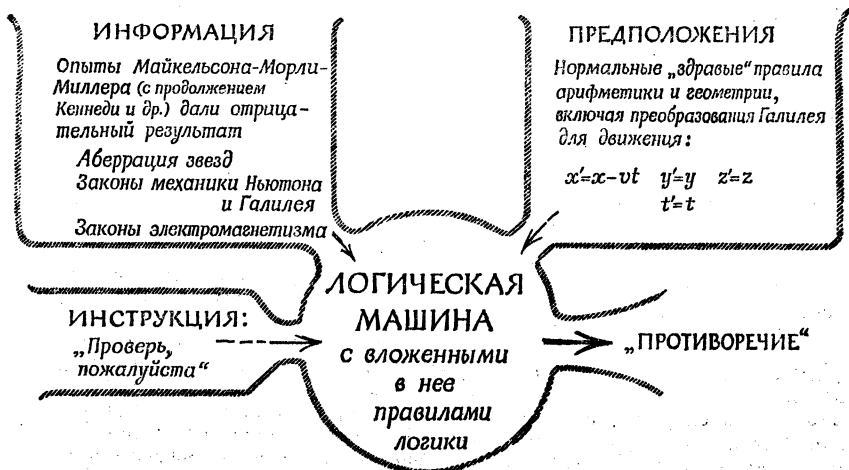
Земля движется по орбите вокруг
Солнца сквозь «эфир»



Земля не движется сквозь «эфир» или
полностью увлекает его

ПРОТИВОРЕЧИЕ

К этому добавляла свои неприятности и развивающаяся теория электричества, ибо уравнения Максвелла, по-видимому, написаны для токов и полей в абсолютном пространстве («эфире»). В отличие от законов Ньютона они изменяются преобразованиями Галилея, приобретая в движущейся лаборатории иной вид. Впрочем, придуманные Лоренцем преобразования сохраняют форму уравнений Максвелла и в случае движущегося наблюдателя. Они, по-видимому, согласуются с фактами: эффекты не зависят от того, что движется — магнит или катушка. При преобразованиях Лоренца опыты по электричеству дают сведения лишь об относительной скорости (что они и делают), но ничего не говорят об абсолютном движении. Однако от преобразований Лоренца страдает механика. Они превращают $F=ma$ и $s=v_0 + 1/2 at^2$ в столь необычную форму, что начинают противоречить наглядной относительности Галилея и простым законам Ньютона.



Фиг. 149.

Для «объяснения» некоторых модификаций опыта Майкельсона — Морли было достаточно фитцджеральдова сокращения. Кеннеди и Торндайк, например, повторили его на приборе с *неравными* длинами плеч. Нулевой результат требовал лоренцева изменения масштаба времени и сокращения длин.

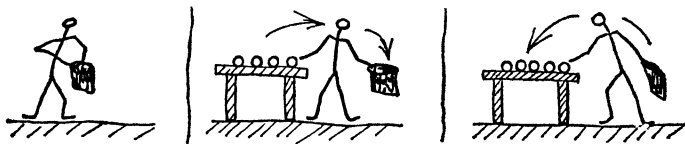
Введем теперь эту информацию в хорошую логическую машину. Она вынесет ясный и строгий приговор: «Информация противоречива». Сигнал очень тревожный. Но прежде чем переходить к решению проблемы, найденному Эйнштейном, прочтите описание поучительного фокуса.

ФОКУС

Этот неправдоподобный трюк познакомит вас с трудностью в признании теории относительности. Счет предметов — вещь абсолютная, не зависящая от точки зрения, так что этот фокус может не понравиться физику с математическим складом ума, хорошо чувствующему природу. Пусть он отнесется к нему со снисхождением. Однако то, что невозможно при сложении шаров, действительно проявилось в сложении скоростей.

Я хочу показать вам фокус. Беру черный мешочек и демонстри-

(Миллер повторил опыт Майкельсона — Морли с большой точностью.) Хотите проверить, нет ли в мешочке потайных карманов? Пожалуйста. Их нет. Вернемся к записи. Мешочек без секретов, шарики круглые и крепкие, подсчитано все правильно: положили $2+2$ и вынули 5. Что вы на это скажете? Если нельзя опровергнуть перепроверенные и несомненные наблюдения, то вы должны либо отречься от науки и потерять рассудок, либо перекроить правила логики, включая и основные правила арифметики. Вы вынуждены



Фиг. 150.

рую, что он пуст. Кладу туда 2 белых шарика. Считайте, один, два..., затем еще два: три, четыре. А теперь смотрите: я вынимаю 5 белых шариков, и мешочек снова пуст. Вложите эти данные в логическую машину и она вам скажет: «Противоречие». Что вы ответите на это? Обман зрения? Нет. Можете проделать это сами.

будете признать: «В некоторых случаях $2+2$ не дает 4». Но прежде чем искать спасения в коварной фразе « $2+2$ дает нечто», вы можете взяться за перечисление событий, где $2+2$ дает 4, например сложение горошин на столе или денег в кошельке, и за перечень событий, где $2+2$ дает нечто другое¹⁾.

¹⁾ Ведь *есть же случаи*, где $2+2$ не равно 4. При сложении двух векторов $2+2$ дает что угодно между 0 и 4. Литр спирта и литр воды при смешивании дают меньше 2 литров. В изображенной на фиг. 151 электрической цепи все сопротивления R одинаковы, но эффект нагревания не складывается. Два тока, выделяющие по 2 дж/сек, складываются в один, выделяющий 8 дж/сек.

Во все века, изучая природу, ученые занимались поисками и отбором тех величин, которые просто складываются наподобие массы жидкости

Для этого фокуса вы имеете три объяснения:

- а) «Это колдовство» — заключение безусловно ложное.
- б) «Работает особый механизм» — заключение едва ли лучше первого, оно отдает науку во власть нечистой силы.

В обычной жизни мы не сталкиваемся с арифметическими парадоксами, однако вернемся к движению. Исключив ошибку эксперимента, мы останемся с теми же возможностями: колдовство, особый механизм, изменение физических законов движения.

Сначала ученые изобретали различные механизмы наподобие сплющивания электронов в эллипсоид при движении, но это привело к еще большим трудностям. Пуанкаре и другие готовы были изменить определение времени и пространства. Затем последовали два блестящих предложения Эйнштейна: *открытая точка зрения* и *единственная гипотеза* — его принцип относительности.

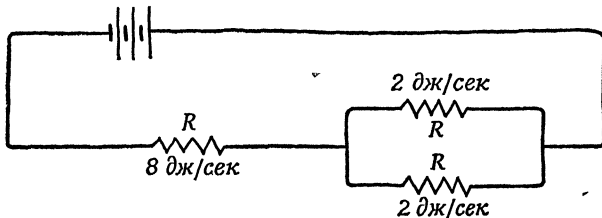
Точка зрения теории относительности состоит в следующем: наука должна строиться на понятиях, которые можно наблюдать экспериментально; нельзя считать реальными ненаблюдаемые детали, вопросы о таких деталях не только не имеют ответа, но даже непристойны и ненаучны. С этой точки зрения абсолютное пространство (и, как полагали, заполняющий его «эфир») нужно выбросить из наших рассуждений, коль скоро мы убедились, что все попытки зарегистрировать его, обнаружить движение в нем обречены на провал. Такая точка зрения просто говорит: «Давайте будем реалистами; ни капли жалости».

Все попытки наподобие эксперимента Майкельсона — Морли — Миллера не указывают на наличие изменений скорости света. Опыты же с абберацией вовсе не говоря, что свет движется с новой скоростью. Они просто дают новое направление его кажущейся скорости. Итак, гипотеза теории относительности состоит в следующем: *Измеряемая скорость света (скорость распространения электромагнитных волн) одна и та же независимо от движения наблюдателя или источника.* Это в корне противоречит здравому смыслу. Мы ожидали, что свет будет двигаться быстрее или медленнее в зависимости от того, бежим мы

(но не объема) и выделения током меди на электродах (но не нагревания). Суть таких «исключений» в том, что все они относятся к случаю, когда при

- в) «Нужно изменить правила арифметики».

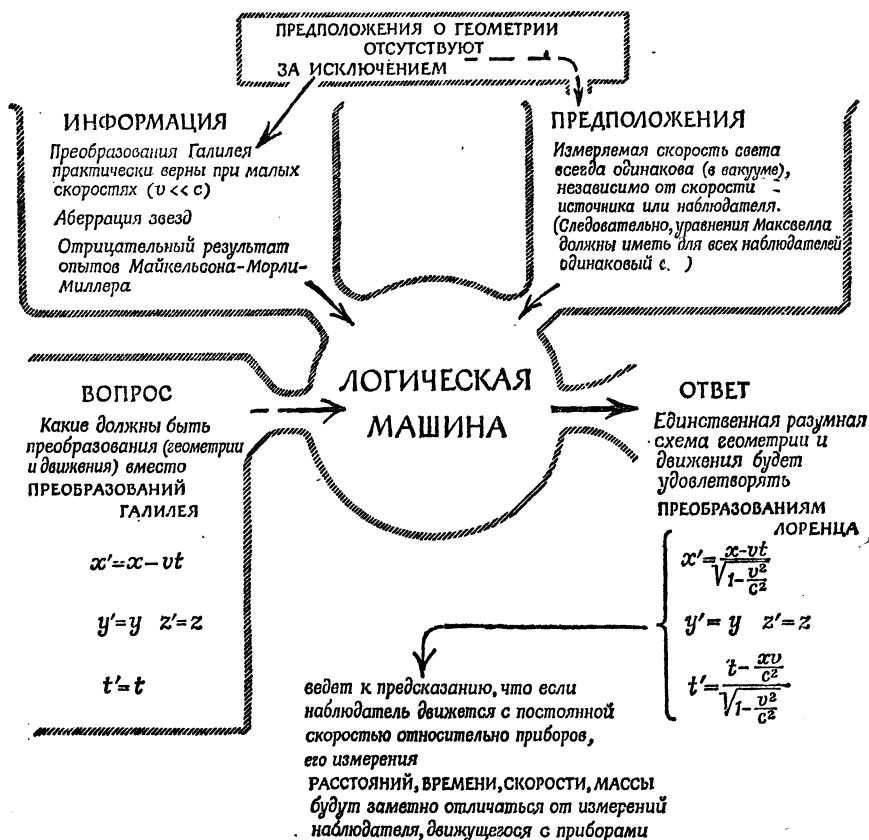
Как это ни неприятно, вернее всего остановиться на нем. Это уже крайние меры. Подумайте внимательно, что бы вы предприняли в таком бедственном положении?



Фиг. 151.

сложении происходит взаимодействие. Величины уже не являются чем-то независимым.

навстречу ему или от него. Тем не менее это просто реалистический итог всех опытов, в которых не удалось обнаружить движение наблюдателя или наличие «эфирного ветра». Вложим эти гипотезы в логическую машину, которая сначала ответила нам «Противоречие», но теперь удалим из нее «геометрические



Фиг. 152.

правила» для пространства-времени и движения, а также преобразования Галилея. Вместо этого попросим ее дать новые (простейшие) правила, которые делали бы всю схему внутренне непротиворечивой. Поскольку механика Ньютона выдержала проверку временем (движение кораблей, поездов, Солнечной системы и т. д.), новые правила должны сводиться при малых скоростях¹⁾

¹⁾ Это одно из приложений великого «принципа соответствия» Бора: в любом предельном случае, где новые требования тривиальны (в нашем случае при малых скоростях), новая теория должна сводиться к старой.

к преобразованиям Галилея. Логическая машина ответила бы: «Есть только одна разумная схема — преобразования, предложенные Лоренцем и принятые Эйнштейном».

Вместо преобразований Галилея

$$x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t$$

должны быть справедливы преобразования Лоренца — Эйнштейна

$$x' = \frac{x - vt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - xv/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

которые при замене v на $-v$ переходят в преобразования

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = \frac{t' + x'v/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

где c — скорость света в пустоте. Эта скорость существенно входит в новые правила измерения, ибо новые преобразования так и выбраны, чтобы все попытки измерить эту скорость давали один и тот же ответ. Симметричная форма преобразований показывает, что эксперимент никогда не выяснит абсолютного движения. Мы можем обнаружить движение одного экспериментатора относительно другого, но никогда не сможем сказать, кто из них движется на самом деле.

Новые преобразования, конечно, объясняют и нулевой результат опыта Майкельсона — Морли — Миллера, ибо они специально для этого предназначены. Они объясняют и аберрацию, предсказывая одну и ту же аберрацию независимо от того, кто движется — звезды или мы. Но они ведут к видоизменению механики Ньютона. Другими словами, из двух бед нам предстоит выбрать наименьшую: старые преобразования нарушают вид законов электромагнетизма, а новые — законов механики. Но старые законы электромагнетизма дают хорошее и простое описание природы в любых экспериментах как при высоких, так и при низких скоростях, а законы механики в своей классической форме все же нарушаются при высоких скоростях. Поэтому мы выбираем новые преобразования, модифицируем с их помощью законы механики и очень довольны, обнаружив, что модифицированные законы прекрасно описывают более точные эксперименты.

Новые преобразования выглядят не очень привлекательно ¹⁾, ибо они сложнее и работать с ними менее приятно. Для сохранения галилеевой относительности Ньютон считал, что длины, массы и время не зависят от наблюдателя и друг от друга. Он мог утверждать, что с помощью механических экспериментов нельзя обнаружить равномерное движение в «пространстве» ²⁾. Когда же Эйнштейн распространил это утверждение на «неудачные» эксперименты со светом, он обнаружил, что результаты измерений длины, времени, а следо-

¹⁾ Эти преобразования могут показаться более разумными, если вы увидите, что они представляют вращение пространственно-временных осей. См. стр. 636.

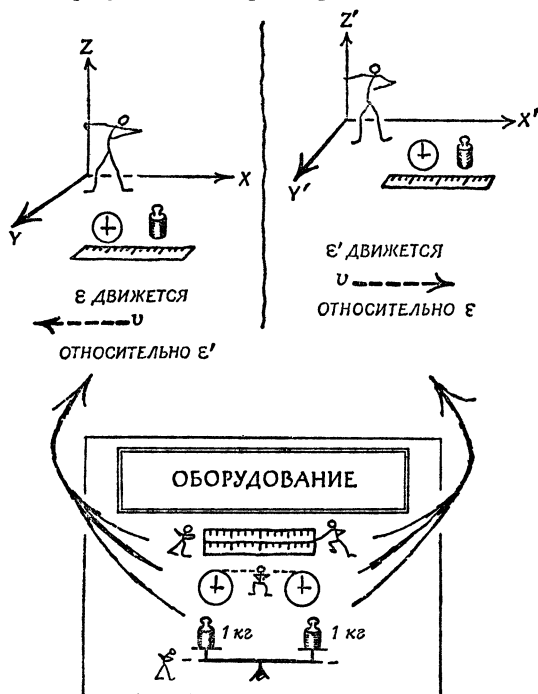
²⁾ Когда опыт привел нас к вере в правильность первого и второго законов Ньютона, то на самом деле просто нам здорово повезло в том смысле, что мы очутились в лаборатории, которая представляет собой практически инерциальную систему. Если бы мы экспериментировали на пляшущем на волнах корабле, то вряд ли могли бы сформулировать столь простые законы.

вательно, и массы у наблюдателей с различными скоростями будут разными. Мы не рассказываем, как работает логическая машина, но на все можно вполне положиться, как и на обычную алгебру ¹⁾.

Мы будем называть их, как принято, *преобразованиями Лоренца*.

Применение преобразований Лоренца

Итак, примем новые усовершенствованные представления и посмотрим, как можно сравнить результаты измерений различных наблюдателей. Вернем-



Фиг. 153.

ся к наблюдателям e и e' , которые снабжены совершенно одинаковыми метрами, часами и стандартными килограммовыми гири. Наблюдатель e' движется вместе со своей системой координат относительно наблюдателя e со скоростью v , а e движется относительно e' назад, со скоростью $-v$.

¹⁾ Более подробно все это изложено во многих книгах. (Существует простое изложение теории относительности, например: А. Эйнштейн, Сущность теории относительности, ИЛ, 1955 и К. Дьюрелл, Азбука теории относительности, изд-во «Мир», изд. второе, 1970.— Прим. ред.)

Преобразования $\varepsilon \rightarrow \varepsilon'$ и $\varepsilon' \rightarrow \varepsilon$ полностью симметричны и говорят только об одной и той же в обоих случаях относительной скорости v без каких-либо указаний на абсолютное движение и намека на то, кто из них «движется на самом деле».

Из этих преобразований вытекают результаты, которые необычны с точки зрения здравого смысла, но проявляются только при чрезвычайно больших скоростях. Наблюдатель, пролетающий мимо лаборатории на самолете или ракете, вполне может пользоваться преобразованиями Галилея. Он не обнаружил бы отклонений от правил сложения векторов и обычных законов движения механики Ньютона.

Скорость света c огромна:

$$c = 300\,000\,000 \text{ м/сек} = 300\,000 \text{ км/сек} \\ \approx 1 \text{ миллиард км/час.}$$

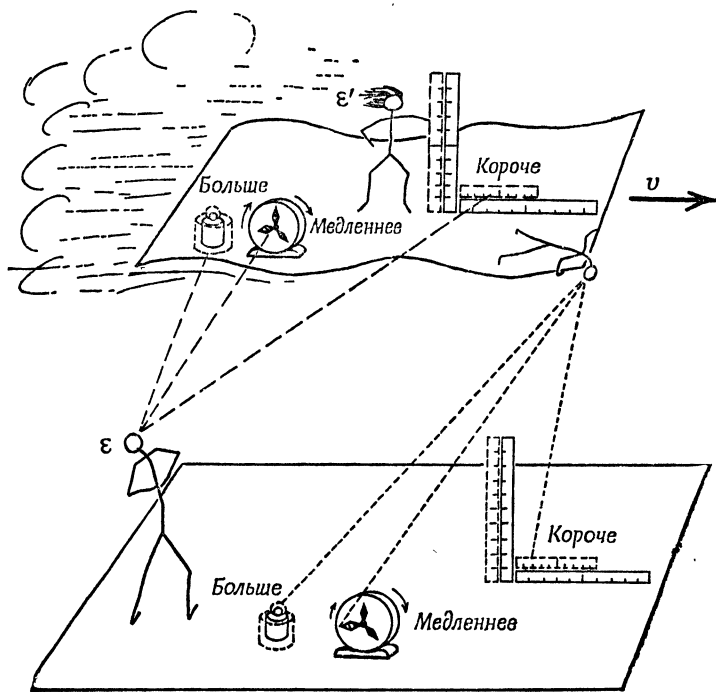
В случае движения с обычными скоростями множитель v/c очень мал, а v^2/c^2 еще меньше. Множитель $\sqrt{1-v^2/c^2}$ для любых практических целей можно считать единицей, а запаздывание времени xv/c^2 настолько незначительно, что практически мы имеем дело с преобразованиями Галилея.

Пусть теперь наблюдатель ε' движется относительно ε с колоссальной скоростью. В своей лаборатории каждый наблюдатель обнаружит одни и те же законы механики, а луч света будет распространяться с одной и той же скоростью в обеих лабораториях. Однако при скоростях 30 000, 60 000, 90 000 км/сек и еще больше наблюдатель ε увидел бы, что у проносящегося мимо него наблюдателя ε' творятся удивительные вещи. Наблюдатель ε воскликнул бы: «Вот чудак, у тебя же все приборы неправильные! Метр — короче моего, правильного, а часы отстают и за каждую секунду по моим точным часам они отсчитывают долю секунды». Между тем наблюдатель ε' не обнаружил бы в своей лаборатории никакого беспорядка и, взглянув на уносящегося ε и его лабораторию, закричал бы: «Сам чудак! У меня-то все в порядке, а посмотри, что творится у тебя! Метр короче ... часы запаздывают ...»

Допустим, наблюдатель ε измеряет и проверяет приборы ε' в тот момент, когда тот пролетает мимо. Оказывается, что метр, который ε считает стандартным, сократился до $\sqrt{1-v^2/c^2}$ м. Стандартные часы тикают медленнее, вместо секунды через каждые $1/\sqrt{1-v^2/c^2}$ сек. А стандартная килограммовая гиря оказывается тяжелее: $1/\sqrt{1-v^2/c^2}$ кг. Вот какие изменения увидит *покоющийся* наблюдатель в *движущейся* лаборатории. Однако *движущийся* наблюдатель, глядя на *покоющуюся* лабораторию, увидит те же самые особенности: метры там короче, часы идут медленнее, а массы увеличиваются. Преобразования Лоренца от ε' к ε и от ε к ε' совершенно симметричны. Если бы ε и ε' сравнили свои записи, они бы безнадёжно переругались, ибо каждый из них обвинял бы другого *в одних и тех же ошибках!* Каждый из них видел бы, что все приборы другого, даже электроны, сжались в направлении движения. Каждый из них видел бы, что часы другого (даже колеблющиеся атомы) идут медленнее. (В направлениях X и Y , перпендикулярных движению, записи ε и ε' сошлись бы.) В том-то и состоит симметрия «относительности», что каждый из наблюдателей видит одни и те же дефекты в лаборатории коллеги *независимо от того, кто из них движется*. Важно только относительное движение между нами и приборами, так что не существует ни малейшей надежды выявить абсолютное движение.

Сокращение размеров и замедление хода часов определяются одним и тем же множителем $1/\sqrt{1-v^2/c^2}$. При обычных относительных скоростях v

двух наблюдателей этот множитель практически равен единице. Преобразования при этом превращаются в преобразования Галилея, характер которых согласуется с нашим «здравым смыслом». Возьмите сверхзвуковой самолет,



„Неподвижная лаборатория“

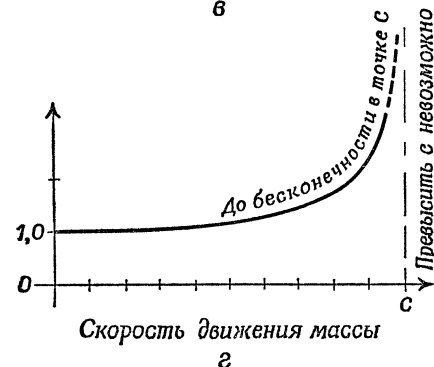
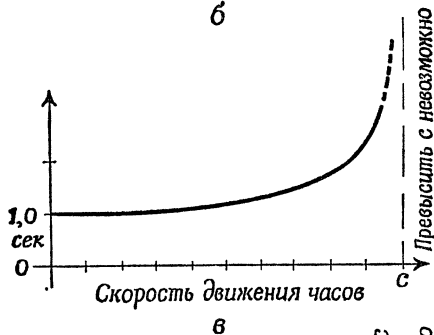
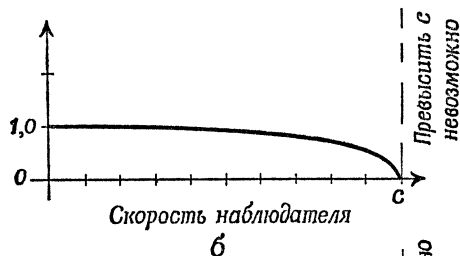
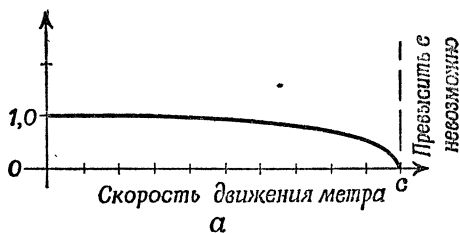
Фиг. 154.

летающий со скоростью 3200 км/час (~900 м/сек). Для такой скорости множитель равен

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,9 \text{ км/сек}}{300\,000 \text{ км/сек}} \right)^2}}, \text{ или } 1,000000000004.$$

Длина самолета сократится, а часы будут идти медленнее, менее чем на половину триллиардной доли процента. При скорости 10 000 000 км/час (около $1/100$ с) множитель вырастает до 1,000005, а при скорости 100 000 000 км/час он превращается в 1,005 и приводит к изменению длины на $1/2\%$.

Вплоть до нашего столетия ученым не приходилось иметь дело со скоростями, близкими к скорости света, за исключением, конечно, самого света, где они сталкивались со сплошными трудностями. Сейчас даже из маленьких цикло-



тронов вырываются протоны со скоростью $\frac{2}{10}c$, что дает множитель 1,02; электроны, порождающие рентгеновские лучи, ударяются о мишень со скоростью $\frac{6}{10}c$, что дает множитель 1,2; β -лучи вылетают из радиоактивных атомов со скоростью $\frac{98}{100}c$, что дает множитель 5, а электроны с энергией в миллиарды электрон-вольт из гигантских ускорителей — со скоростью 0,99999988 c и характеризуются множителем 2000.

В составе космических лучей имеются очень быстрые частицы — μ -мезоны. Энергия некоторых из них составляет около 1000 миллионов электрон-вольт, а скорость — $\frac{199}{200}$ скорости света. Для них

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} &= \\ &= \frac{1}{\sqrt{1-199^2/200^2}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{1/100}} = 10. \end{aligned}$$

Эти мезоны представляют собой нестабильные частицы со временем жизни около $2 \cdot 10^{-6}$ сек (2 мксек). Они возникают при соударениях в верхних слоях атмосферы, и что-

Фиг. 155. Изменения, предсказываемые теорией относительноности.

а — длина движущегося метра по измерениям неподвижного наблюдателя; б — длина неподвижного метра по измерениям движущегося наблюдателя; в — время между тиканием стандартных часов по оценке неподвижного наблюдателя, г — масса стандартного килограмма по оценке неподвижного наблюдателя.

бы дойти до нас, им требуется около $20 \cdot 10^{-6}$ сек. Кажется загадочным, как могут они прожить столь долго. Теория относительности дает ответ на эту загадку: мы наблюдаем за внутренними часами летящих мезонов. А по нашим часам они идут медленнее в 10 раз. Так что время жизни летящего мезона должно казаться нам равным $20 \cdot 10^{-6}$ сек. С точки зрения μ -мезона его время жизни нормальное, 2 мксек, но толщина проносщейся мимо него атмосферы сокращается в 10 раз по сравнению с нашими представлениями. Так что за свою короткую жизнь он успевает пройти этот путь.

Измерительные линейки и часы

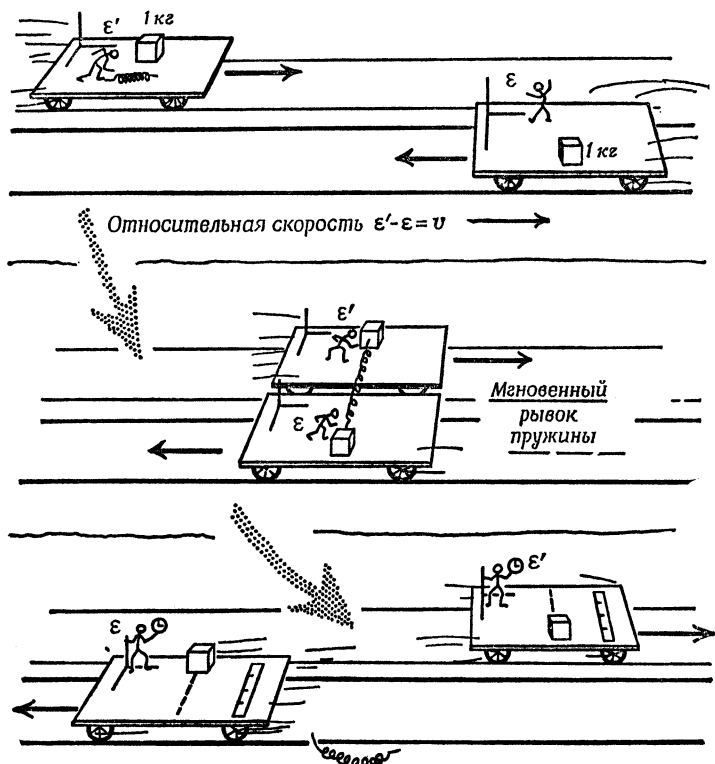
Измерительные линейки мы привыкли считать неизменными стандартами, прикладывая которые можно измерить длины или указать направления. Правда, это относится к идеализированному метру, который не коробится от сырости и не расширяется при изменениях температуры, но и эти слабости не могут поколебать доверия к его свойствам. Его длина была *неизменной инвариантной*. То же относится и к интервалу времени между «тиканием» хороших часов. (Если вы не доверяете маятниковым часам, возьмите настольные атомные часы.) Но теория относительности предупреждает, что измерительные линейки не обладают неизменной длиной. Вся идея твердого тела — безобидное и полезное представление физики XIX века — теперь только вводит в заблуждение. То же самое произошло и с идеей абсолютного времени, текущего независимо от пространства. Вместо этого оказалось, что движение влияет на наши измерения и только *скорость света неизменна*. С более общей точки зрения скорость света c — масштабный фактор нашего выбора единиц в сложном пространстве-времени, которое для разных наблюдателей течет по-разному.

Изменение массы

Если длина и время изменяются, то должна изменяться *также и масса*. Мысленный эксперимент, предложенный Толменом, поможет нам выяснить, какой должна быть масса по измерению движущегося наблюдателя. Будем считать, что закон сохранения импульса справедлив в любой (инерциальной) системе — мы должны опереться на какие-то правила, иначе не миновать произвола.

Пусть снова наблюдатели ϵ и ϵ' движутся в своих лабораториях с относительной скоростью v в направлении оси X . Допустим, они сделали два платиновых кубика, каждый из которых равен стандартному килограмму и которые совершенно одинаковы. Они могут, если угодно, даже пересчитать там все атомы. Каждый из наблюдателей помещает этот кубик на идеально гладкий стол (фиг. 156). Пролетая мимо друг друга, они прицепляют в этот момент к кубикам длинную легкую пружину, направленную вдоль оси Y . Пружина дергает эти кубики, затем ее удаляют, а кубики приобретают некоторый импульс в направлении оси Y . После этого каждый экспериментатор измеряет компоненту скорости своего кубика вдоль оси Y и вычисляет его импульс. Затем записи сравниваются: каждый записал для своего кубика скорость 3 м/сек. «Раз скорости равны и противоположны, — заключают они, — то должны быть равны и противоположны импульсы». Им нравится принимать в качестве рабочего правила третий закон Ньютона. Но когда ϵ наблюдал, как работает ϵ' , он видел, что тот пользуется часами, которые идут медленнее (хотя он согласен с метром, которым пользуется ϵ' для измерений вдоль оси Y). Поэтому ϵ видел,

что, когда ϵ' измерил за 1 сек 3 м, на самом деле по часам ϵ требовалось *более* 1 сек. Следовательно, будь у него верные часы, ϵ' намерил бы скорость *меньше* 3 м/сек в $1/\sqrt{1-v^2/c^2}$ раз. Доверяя третьему закону Ньютона и закону сохране-



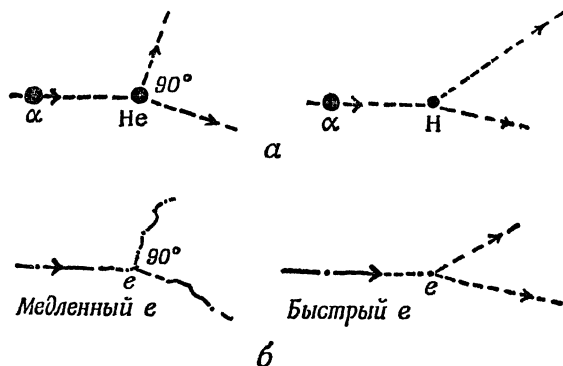
Фиг. 156.

ния импульса, ϵ пришел бы к выводу, что раз его кубик приобрел импульс $1 \text{ кг} \cdot 3 \text{ м/сек}$, то масса другого кубика, двигавшегося по его расчету медленнее, должна быть больше ¹⁾ в $1/\sqrt{1-v^2/c^2}$ раз. Но в то время как кубик после рыв-

¹⁾ Допустим, что ϵ и ϵ' пролетают мимо друг друга со скоростью 165 000 км/сек. Тогда ϵ видит, что часы, которыми пользуется ϵ' , идут медленнее и тикают через каждые 1,2 сек. Таким образом, он знает, что кубик наблюдателя ϵ' обладает скоростью 3 м/1,2 сек, или 2,5 м/сек. Его же кубик обладает импульсом $1 \text{ кг} \cdot 3 \text{ м/сек}$. Для сохранения импульса он должен считать, что другой кубик имел импульс $1,2 \text{ кг} \cdot 2,5 \text{ м/сек}$, так что масса другого кубика должна составлять 1,2 кг, т. е. возрасти на 20%.

ка пружины движется поперек стола, е видит, что и кубик, и стол, и все остальное несется в направлении оси X с громадной скоростью v . Владелец кубика e' , который покоится относительно стола, говорит, что масса его кубика 1 кг. Но наблюдателю e , проносящемуся мимо e' , кажется, что масса этого кубика больше в $1/\sqrt{1-v^2/c^2}$ раз.

Этот результат применим к любым движущимся массам. Для разных наблюдателей масса имеет разное значение. Посадите наблюдателя на движущееся тело, и он измерит так называемую «массу покоя», которая одинакова у всех электронов, у всех протонов, у каждого литра воды и т. п. Но, пролетая



Фиг. 157. Упругое соударение релятивистских масс.

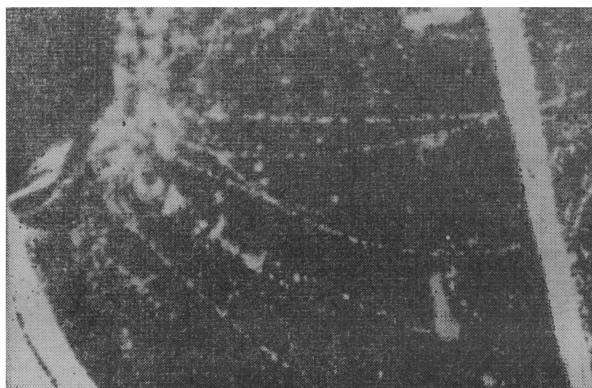
a — столкновение α -частицы с покоящимся атомом. Несмотря на высокую энергию, α -частица из радиоактивного атома обладает скоростью 0,1 с, так что ее масса увеличивается незначительно. При столкновении с неподвижной частицей (ядро He) той же массы она дает вилку с углом 90° ; при столкновении с атомом водорода выявляется большая масса α -частицы; $б$ — столкновение медленного электрона с неподвижным. Получается вилка e углом 90° . При столкновении быстрого электрона с неподвижным угол указывает на гораздо большую массу быстрого электрона.

мимо тела или видя, как тело проносится мимо него, наблюдатель обнаружит, что тело имеет большую массу: $m = m_0/\sqrt{1-v^2/c^2}$. Для обычных скоростей множитель $1/\sqrt{1-v^2/c^2}$ практически не дает никакого эффекта. Одного ионы, ускоренные в циклотроне, значительно увеличивают свою массу. На свой возросший путь они тратят теперь слишком много времени, и если не принять особых мер, то они будут запаздывать все больше и больше! Электроны из ускорителей на миллиарды электрон-вольт настолько массивны, что вполне могут сойти за протоны.

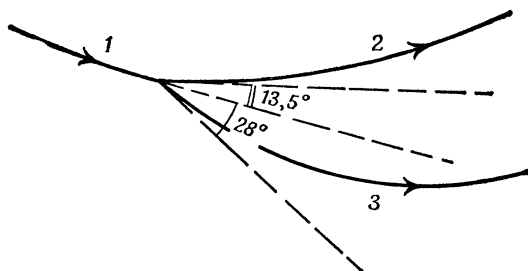
Возьмем, к примеру, электрон из ускорителя на энергию два миллиона электрон-вольт, который вылетает со скоростью около 294 000 000 м/сек, или 0,98 с. Для него $1/\sqrt{1-(98/100)^2} \approx 1/\sqrt{4/100} = 5$. Таким образом, для покоящегося наблюдателя масса электрона в 5 раз больше массы покоя ¹⁾. (А вот другой

¹⁾ Для летящего электрона или соседа, летящего с ним бок о бок, их массы — нормальные массы покоя, а вот у проносящегося мимо экспериментатора масса в 5 раз больше его массы покоя, к тому же он сплюснут в 5 раз по сравнению со своей нормальной толщиной.

способ получить этот результат. Кинетическая энергия электрона равна 2 млн. эв, а энергия, связанная с массой покоя, 0,5 млн. эв. Следовательно, этот электрон имеет кинетическую энергию, соответствующую 4 массам покоя, что вместе с первоначальной массой дает 5 масс покоя.)



Фиг. 158. Фотография соударения очень быстрого электрона с неподвижным в камере Вильсона.



Фиг. 159. Измерения представленной на фиг. 158 фотографии.

Эта зависимость от скорости проверялась отклонением очень быстрых электронов (β -лучей) электрическими и магнитными полями; результат превосходно совпал с предсказаниями. Другая проверка: соударение очень быстрых электронов с покоящимися электронами в камере Вильсона, которые не дают ожидаемой прямоугольной вилки. Зато измерение углов на фотографии фиг. 158 согласуется с предсказанием

теории относительности для упругого столкновения массы $12,7 m$ и покоящейся массы m . Следы частиц искривлены, ибо все это происходило в сильном магнитном поле, перпендикулярном плоскости картинки (фиг. 159). Измерение кривизны дает импульс каждого из электронов после соударения и импульс налетающего электрона до соударения. Измерение углов подтверждает пропорцию этих импульсов. Если для вычисления масс воспользоваться формулой нерелятивистской механики ($E_{\text{кин}} = \frac{1}{2} m v^2$ и т. д.), предполагая упругое соударение, то масса налетающей частицы должна быть примерно в 4 раза больше массы частицы-мишени. Тем не менее следы выглядят как электрон-электронное соударение и мы не можем приписать двум электронам классические массы m и $4m$. Поэтому попытаемся проверить релятивистскую механику с $E_{\text{кин}} = (m - m_0)c^2$

$$\text{ИМПУЛЬС} = mv \quad \text{и} \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Тогда все оказывается согласованным. Из величины магнитного поля и измерения кривизны находим:

ДО СОУДАРЕНИЯ

налетающий электрон имеет массу $12,7 m_0$ и скорость $0,9969 c$.

Поскольку следы коротки и слабо искривлены, радиус кривизны измерить очень точно не удастся. Поэтому импульс налетающей частицы, а следовательно, ее масса определяются с точностью до 6%. Другими словами,

$$\text{Масса} = 12,7 m_0 \pm 6\% = 12,7 m_0 \pm 0,8 m_0.$$

ПОСЛЕ СОУДАРЕНИЯ

разлетающиеся частицы имеют массы $8,9 m_0$ и $4,3 m_0$ и скорости $0,9936 c$ и $0,9728 c$,

где m_0 — масса покоя электрона, а c — скорость света. До соударения полная масса была равна $13,7 m_0$ (включая массу мишени); после соударения она стала $13,2 m_0$. В этом соударении масса сохраняется в пределах точности 6%, подобно энергии, измеряемой теперь величиной mc^2 .

Смысл изменения массы

Существует простая физическая интерпретация изменений массы: добавочная масса является массой, соответствующей кинетической энергии тела. Проверим это с помощью алгебры, воспользовавшись разложением радикала для достаточно малых скоростей в ряд:

$$\begin{aligned} m &= \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = m_0 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-1/2} \\ &= m_0 \left[1 - \left(-\frac{1}{2} \right) \frac{v^2}{c^2} + \frac{(-1/2)(-3/2)}{1} \frac{v^4}{c^4} + \dots \right] \\ &= m_0 \left[1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \text{Высшие степени } \frac{v^2}{c^2}, \text{ которые} \right] = \\ &\quad \text{малы для малых скоростей} \end{aligned}$$

$$= m_0 + \frac{1}{2} m_0 \frac{v^2}{c^2} + \text{Пренебрежимо малые величины при ма-}$$

лых скоростях

$$= \text{Масса покоя} + \frac{E_{\text{кин}}}{c^2}$$

$$= \text{Масса покоя} + \text{Масса, соответствующая кинетической энергии.}$$

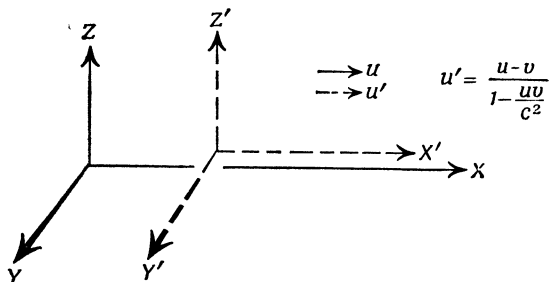
Максимальная скорость c

По мере роста скорости тела и приближения ее к скорости света ускорять тело становится все труднее и труднее — масса его приближается к бесконечности. Экспериментаторы, работающие с линейными ускорителями (которые разгоняют электрон по прямой), обнаруживают, что при высоких энергиях их «подопечные» приближаются к скорости света, но никогда не превосходят ее. При каждом последующем толчке электрон приобретает большую энергию (и, следовательно, большую массу), но становится лишь чуть-чуть быстрее (поэтому ускоряющие промежутки можно равномерно располагать вдоль пучка, что будет неким упрощением конструкции).

Рост массы до бесконечности при приближении к скорости света означает бесконечное «затруднение ускоряться». Наши попытки заставить тело двигаться быстрее остаются тщетными до тех пор, пока тело не достигнет очень больших скоростей, где приходится «карабкаться» по все более и более крутому склону к отвесной стене, когда скорость подходит к скорости света. Поэтому не следует удивляться предсказанию теории относительности, что *никакое тело не может двигаться быстрее скорости света*, ибо при попытке ускорить его до этой скорости мы сталкиваемся со все большей и большей массой и, следовательно, получаем все меньший отклик на действие ускоряющей силы.

Релятивистское сложение скоростей

Двигаться быстрее света? Ну, конечно, это возможно: возьмите на ракету, летящую со скоростью $\frac{3}{4}c$, ружье и выстрелите вперед пулей, летящей со ско-



Фиг. 160. Измерение скорости.

ростью $\frac{1}{2}c$ относительно ружья. Тогда скорость пули будет $\frac{1}{2}c + \frac{3}{4}c = \frac{5}{4}c$. Но ведь это галилеево сложение скоростей, а нам нужно найти релятивистское правило!

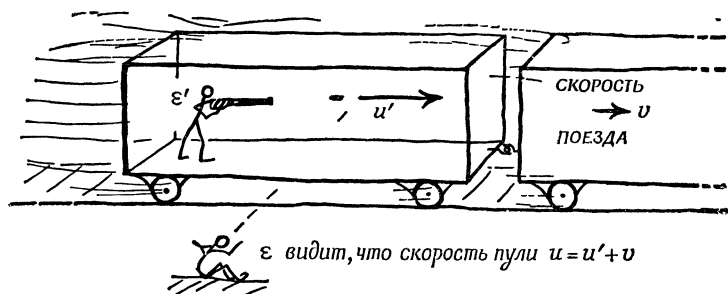
Пусть наблюдатель ϵ в своей лаборатории видит тело, движущееся со скоростью u вдоль оси X . Какова скорость этого тела по мнению наблюдателя ϵ' ? По измерениям ϵ скорость $u = \Delta x / \Delta t$, а по измерениям ϵ' скорость $u' = \Delta x' / \Delta t'$, и простая алгебра с использованием преобразований Лоренца дает

$$u' = \frac{u - v}{[1 - uv/c^2]}$$

вместо галилеева $u' = (u - v)$. Обратное преобразование дает

$$u = \frac{u' + v}{[1 + u'v/c^2]}.$$

Для обычных скоростей скобка $[\quad]$ в знаменателе практически равна единице и формула сложения скоростей сводится к галилеевой. Проверьте это для



Фиг. 161. Сложение обычных скоростей.

пули, выпущенной из ружья в вагоне обычного экспресса. Едущий в вагоне наблюдатель ϵ' видит, что из ружья вылетает пуля со скоростью u' , а наблюдатель ϵ , сидящий у полотна, видит, что пуля движется со скоростью u . Экспресс же, по его наблюдениям, проносится мимо со скоростью v . Тогда $u = (u' + v) / [1]$. Формула Галилея дает:

СКОРОСТЬ ПУЛИ

ОТНОСИТЕЛЬНО ЗЕМЛИ =

$$= \frac{\text{СКОРОСТЬ ПУЛИ}}{\text{ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЕЗДА}} + \frac{\text{СКОРОСТЬ ПОЕЗДА}}{\text{ОТНОСИТЕЛЬНО ЗЕМЛИ}}.$$

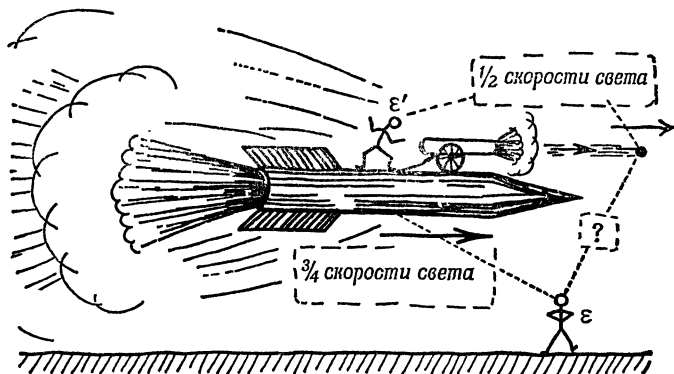
Обратимся снова к опыту с ружьем на ракете, летящей со скоростью $3/4 c$, из которого со скоростью $1/2 c$ вперед вылетает пуля. Сидящий в ракете наблюдатель ϵ' видит, что пуля вылетает со скоростью $u' = 1/2 c$, а находящийся на земле наблюдатель ϵ видит, что ϵ' и ракета несутся со скоростью $3/4 c$; от ϵ' он знает, с какой скоростью из ружья вылетает пуля. Воспользовавшись затем релятивистской формулой, ϵ предсказывает скорость пули:

$$u = \frac{u' + v}{1 + u'v/c^2} = \frac{1/2 c + 3/4 c}{1 + (1/2 c)(3/4 c)/c^2} = \frac{11/4 c}{1 + 3/8} = \frac{5/4 c}{11/8} = \frac{10}{11} c,$$

т. е. немного меньше c .

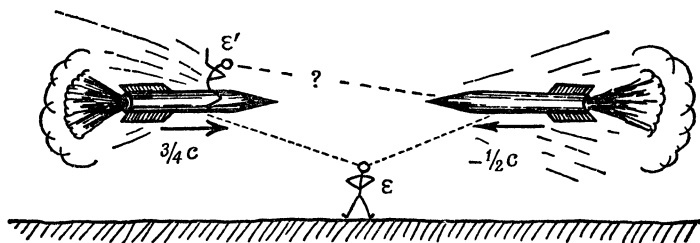
$$\begin{aligned} \text{СКОРОСТЬ ПУЛИ ОТНОСИТЕЛЬНО ЗЕМЛИ} = & \frac{\text{СКОРОСТЬ РУЖЬЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЗЕМЛИ} + \text{СКОРОСТЬ ПУЛИ ОТНОСИТЕЛЬНО РУЖЬЯ}}{1 + \frac{\text{СКОРОСТЬ ПУЛИ}}{\text{СКОРОСТЬ СВЕТА}} \cdot \frac{\text{СКОРОСТЬ РУЖЬЯ}}{\text{СКОРОСТЬ СВЕТА}}} . \end{aligned}$$

Предпримем еще одну попытку превысить скорость света c . Запустим две ракеты навстречу друг другу со скоростями $\frac{3}{4}c$ и $\frac{1}{2}c$. Стоящий на земле на-



Фиг. 162. Сложение очень больших скоростей.

блюдатель ϵ видит своего коллегу ϵ' на ракете, летящей со скоростью $v = \frac{3}{4}c$, и другую ракету, летящую со скоростью $u = -\frac{1}{2}c$. Он думает, что ракеты дол-



Фиг. 163. Две сближающиеся ракеты.

жны сближаться с относительной скоростью $1\frac{1}{4}c$. Однако сидящий на ракете наблюдатель ϵ' видит, что вторая ракета приближается к нему со скоростью

$$\begin{aligned} u' &= \frac{u - v}{1 - uv/c^2} = \frac{(-\frac{1}{2}c) - (\frac{3}{4}c)}{1 - (-\frac{1}{2}c)(\frac{3}{4}c)/c^2} \\ &= \frac{-\frac{5}{4}c}{1 + \frac{3}{8}} = -\frac{10}{11}c. \end{aligned}$$

Их скорость сближения меньше c . Что бы мы ни делали, нельзя заставить материальное тело двигаться быстрее скорости света с точки зрения любого наблюдателя.

Скорость света

Для проверки нового правила сложения скоростей убедимся, что с точки зрения наблюдателей, движущихся с разными скоростями, оно дает одну и ту же скорость света. Возьмем световой сигнал, распространяющийся, согласно ϵ , со скоростью c . Наблюдатель ϵ' , двигаясь со скоростью v относительно ϵ в том же направлении, видит, что световой сигнал распространяется со скоростью

$$u' = \frac{u-v}{1-uv/c^2} = \frac{c-v}{1-cv/c^2} = \frac{c(1-v/c)}{1-v/c} = c.$$

Каждый наблюдатель получает одну и ту же скорость света c . (Удивляться здесь нечему, ибо преобразования Лоренца на это и рассчитаны.) Такой результат, несомненно, объясняет нулевой результат опыта Майкельсона — Морли — Миллера.

Энергия

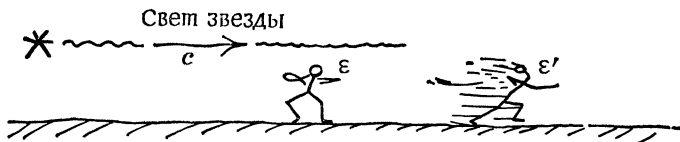
Видоизменим теперь точку зрения Ньютона, чтобы привести ее в соответствие с теорией относительности. Определим *импульс* как mv , где m — масса движущегося тела: $m = m_0 / \sqrt{1-v^2/c^2}$. Определим силу F как $\Delta(mv)/\Delta t$, а переход потенциальной энергии в кинетическую — как *работу* $F \cdot \Delta s$. Скомбинируем их и вычислим кинетическую энергию массы m , движущейся со скоростью v . Приведем только результат:

$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$	$\left. \begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} \text{Следствие преобразований} \\ \text{Лоренца} \end{array} \right] \\ \left[\begin{array}{l} \text{Второй закон Ньютона} \\ \text{в релятивистской форме} \end{array} \right] \\ \left[\begin{array}{l} \text{Определение кинетической} \\ \text{энергии} \end{array} \right] \end{array} \right\}$
$F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t}$	
$\begin{aligned} \Delta(E_{\text{кин}}) &= F \cdot \Delta s \\ &= F \cdot v \cdot \Delta t \\ E_{\text{кин}} &= 0, \text{ если } v=0 \end{aligned}$	

Дифференциальное
исчисление

$$\begin{aligned} E_{\text{кин}} &= mc^2 - m_0 c^2 \\ &= (m - m_0) c^2. \end{aligned}$$

Мы приписываем телу постоянный запас «энергии покоя», m_0c^2 , заключенный, по-видимому, в атомных силовых полях. Добавляем ее к $E_{\text{кин}}$ и получаем полную энергию тела E , равную $m_0c^2 + (mc^2 - m_0c^2) = mc^2$, т. е. $E = mc^2$.



Фиг. 164. Измерение скорости одного и того же луча света.

Это справедливо независимо от скорости, но следует помнить, что m изменяется со скоростью. При малых скоростях mc^2 сводится к

$$(\text{Энергия покоя } m_0c^2) + (E_{\text{кин}} = \frac{1}{2}mv^2).$$

(См. выше рассуждения о разложении бинорма).

Короткий и прямой вывод соотношения $E = mc^2$ дан ниже.

ВЫВОД СООТНОШЕНИЯ $E = mc^2$

Этот краткий вывод, данный Эйнштейном, основан на экспериментальном факте, который состоял в том, что при поглощении веществом излучения с энергией E дж ему сообщается импульс E/c кг·м/сек. Опыты показывают, что давление излучения на поглощающую стенку равно количеству энергии в единице объема излучения. Допустим, что пучок площадью A падает по нормали на поглощающую поверхность. За время Δt на поглотитель падает пучок длины $c \cdot \Delta t$. Тогда импульс, сообщенный за время Δt , равен

$$\begin{aligned} \text{ИМПУЛЬС} &= \text{СИЛА} \cdot \Delta t = \\ &= \text{ДАВЛЕНИЕ} \cdot \text{ПЛОЩАДЬ} \cdot \Delta t \\ &= \frac{\text{ЭНЕРГИЯ}}{\text{ОБЪЕМ}} \cdot \text{ПЛОЩАДЬ} \cdot \Delta t \\ &= \frac{\text{ЭНЕРГИЯ}}{A \cdot c \cdot \Delta t} \cdot A \cdot \Delta t \\ &= \frac{\text{ЭНЕРГИЯ}}{c}. \end{aligned}$$

Это следует также из уравнений Максвелла.

Рассмотрим один и тот же мысленный эксперимент с двух точек зрения.

А. Поместим кубик вещества на идеально гладкий стол, снабдим его дополнительной энергией E и направим на него порцию излучения с энергией $\frac{1}{2}E$ справа и порцию с энергией $\frac{1}{2}E$ слева. Кубик поглощает излучение и приобретает энергию E , но полное приращение импульса равно нулю — он остается в покое.

Б. Как протекает это событие с точки зрения движущегося наблюдателя?

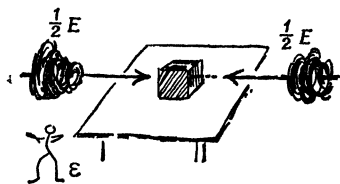
Он движется со скоростью v к северу, но, согласно принципу относительности, можно считать, что он находится в покое, а стол и все прочее движется к югу со

Представление о единстве энергии и массы в соответствии с формулой $E=mc^2$ выдержало множество успешных проверок в ядерной физике. Мы вновь и вновь обнаруживаем, что часть массы элементарных частиц исчезает при ядерных расщеплениях, но при этом возникает избыток энергии — излучения в одних случаях и кинетической энергии разлетающихся осколков в других. Эта энергия уносила «недостающую» массу.

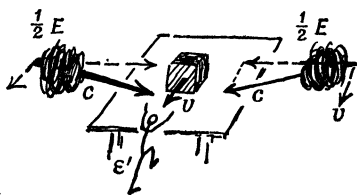
Выражение для массы $m=m_0/\sqrt{1-v^2/c^2}$ следует из преобразований Лоренца и закона сохранения импульса. Таким образом, $E=mc^2$ следует из второго и третьего законов Ньютона в комбинации с преобразованиями Лоренца.

Если наблюдатель приписывает движущемуся телу массу m , импульс mv и полную энергию mc^2 , то он обнаружит, что в любой замкнутой системе сохраняются масса, импульс (как векторная сумма импульсов) и энергия. При этом для тела, движущегося с относительной скоростью v , он должен пользоваться наблюдаемой массой $m=m_0/\sqrt{1-v^2/c^2}$. Однако ему приходится повторять, ибо если сумма всех масс ($m_1+m_2+\dots$) постоянна, то полная энергия ($m_1c^2+m_2c^2+\dots$) также должна быть постоянной. Если энергия сохраняется, должна сохраняться и масса. Получив один закон, мы получим и второй. Вот почему некоторые ученые безответственно заявляют: «масса и энергия — одно и то же, за исключением множителя c^2 ». Поскольку c — универсальная постоянная, такое утверждение не приносит большого вреда, хотя обычно масса и энергия измеряются в разных единицах. Нет большого вреда и в том, что вы

скоростью v . По его мнению, кубик движется к югу с импульсом Mv , а обе порции излучения налетают на кубик со скоростью c под углом, определяемым v/c .



излучение, наблюдателю по-прежнему кажется, что кубик движется на юг с той же скоростью v . Поэтому мы говорим, что в варианте А кубик не приобретает ни-



Фиг. 165.

(Это напоминает *абберацию света звезд*.) Каждая порция, с его точки зрения, обладает импульсом $(\frac{1}{2} E/c)$ с составляющей в направлении на юг, равной $(\frac{1}{2} E/c) (v/c)$.

Считая себя покоящимся, наблюдатель видит, что полный импульс будет $Mv + 2(\frac{1}{2} E/c) (v/c)$. После того как кубик поглотил

какого импульса. Выясним, какая должна быть масса m , если мы верим в сохранение импульса:

$$Mv + 2 \left(\frac{1}{2} \frac{E}{c} \right) \left(\frac{v}{c} \right) = (M + m) v,$$

т. е. $m = E/c^2$ или $E = mc^2$, где m — увеличение массы, соответствующее увеличению энергии на E .

думаете о нем как о физической концепции. Однако остается очень важное различие между *веществом* и *излучением* (а также и другими формами энергии). Вещество состоит из частиц, *полное число которых остается постоянным*, при условии, что рождение и уничтожение пары [частица+античастица] не вносит никаких изменений. Излучение же состоит из фотонов, а их полное число *изменяется* при испускании и поглощении веществом.

Ковариантность

Далее, Эйнштейн рассматривал импульс как некий «сверхвектор» с тремя пространственными компонентами и *полной* энергией в качестве четвертой временной компоненты. Таким образом, законы сохранения массы, импульса и энергии в релятивистской механике можно связать воедино. Преобразования Лоренца *сохраняют вид* этой формулы для любых (равномерно движущихся) систем отсчета независимо от их скорости. Подобные формулы или соотношения мы называем «ковариантными». В ковариантность вкладывается большой смысл: ковариантные законы обладают наибольшей общностью из всех возможных, и мы чувствуем, что это наиболее совершенное математическое выражение законов природы. Как сказал Фредерик Кеффер: «Мы потеряли систему отсчета, но приобрели универсальную символическую форму».

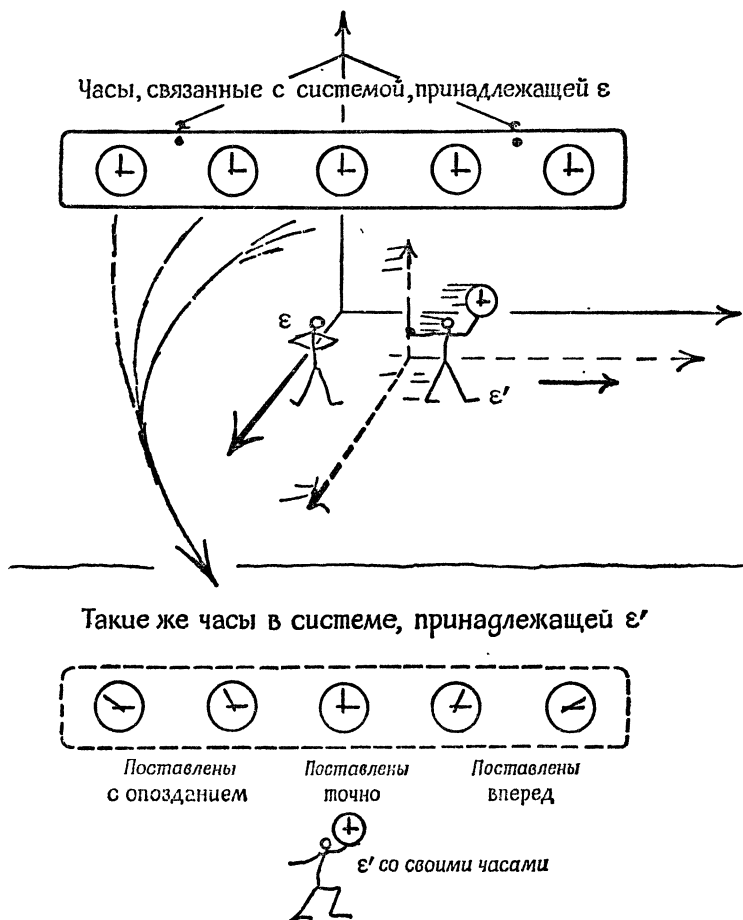
«Незаконный вопрос»

Ковариантность законов механики и электромагнетизма не оставляет никакой надежды на возможность обнаружения абсолютного движения. Это вновь приводит нас к основному принципу Эйнштейна, согласно которому ответ «невозможно» означает просто, что вопрос не имел смысла. Считать, что *существует* абсолютное пространство, что мы и делаем, задавая вопрос: «С какой скоростью ... в абсолютном пространстве?» — совершенно ненаучно. Упомянутое пространство, мы тем самым задаем еще один вопрос. Это незаконный прием, как и вопрос юриста: «Отвечайте мне только «да» и «нет». Вы перестали бить свою жену?» Ответ на *него* может быть только таким: «Разумный человек не отвечает на бессмысленные вопросы». Эйнштейн же предполагал, что разумный ученый не будет *задавать* бессмысленных вопросов.

Одновременность

Наблюдатели e и e' не просто видят, что часы партнеров отстают. Дело обстоит куда хуже. Часы, расположенные на разных *расстояниях*, кажутся несинхронизованными. Допустим, каждый наблюдатель выстроил в своей лаборатории вдоль оси X целый ряд часов и все они показывают одно и то же время. Когда e и e' проносятся друг мимо друга, то в начале координат они сверяют свои центральные часы. После этого каждый из них обвинял бы другого: «Его часы не были синхронизованы. Удаленные часы идут неверно даже по сравнению с его собственными центральными часами, и чем они дальше — тем больше ошибка. Чем дальше находятся часы в направлении движения в этом ряду, тем сильнее они отстают. Они показывали по сравнению с моим собственным временем более ранние часы. В направлении же, противоположном его движению, часы опережают мои все больше и показывают более поздний час по сравнению с моими правильными». (Это обвинение, предъявляемое каждым из наблюдателей, не объясняется кажущимся запаздыванием

времени по удаленным часам, обусловленным, конечно, скоростью распространения света. Каждый наблюдатель учитывает такое запаздывание или сравнивает свои часы, находящиеся в тот момент рядом с другими, и все же обнару-



Фиг. 166. Расстановка «синхронизованных» часов.

живает расхождение. Это отсутствие синхронизации удаленных часов связано с представлением каждого наблюдателя о скорости хода часов. Каждый заявляет, что часы партнера отстают. Каждый говорит: «Его центральные часы идут медленнее моих. Сейчас они сверены с моими, но некоторое время тому

назад, когда они были вдаль от меня, они должны были показывать более позднее время, чем мои. Вот почему сейчас показания наших часов совпадают. Позднее, когда они удалятся в другую сторону, они будут показывать более раннее время, нежели мои, так как эти часы идут слишком медленно».)

Согласно наблюдению ϵ , все его часы идут синхронно, в такт. Согласно ϵ' , они тикают не синхронно. *События, которые одновременны для ϵ , не одновременны для ϵ' .* Это серьезное изменение обычной точки зрения об универсальности времени, но оно является частью преобразований Лоренца. Вопрос об одновременности сыграл важную роль в процессе развития Пуанкаре и Эйнштейном принципа относительности. Обсуждая мысленные эксперименты, в которых скорость v постоянна, вы можете показать, что такое изменение необходимо.

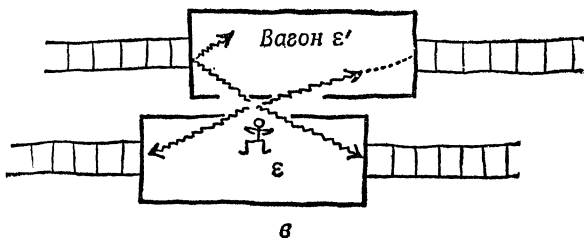
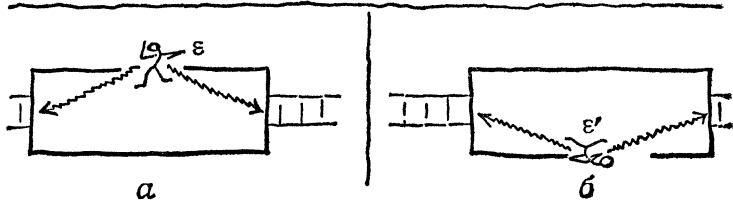
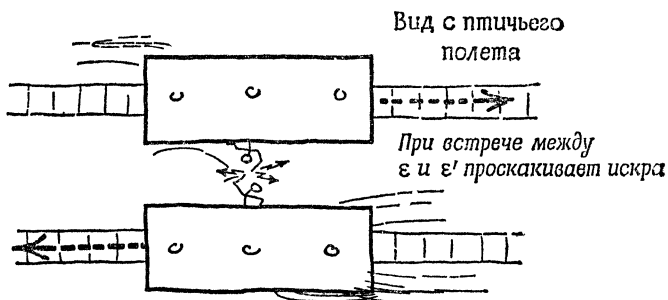
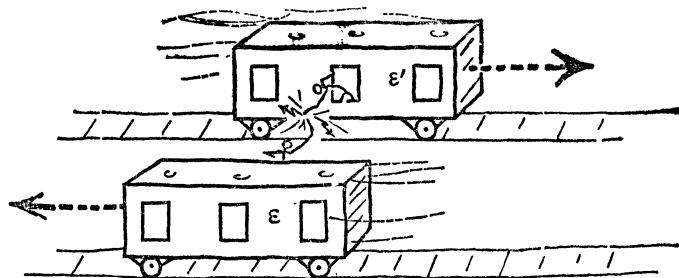
Это иллюстрируется следующим примером.

Пример

Наблюдатели ϵ и ϵ' расположили свои лаборатории в двух прозрачных железнодорожных вагонах на параллельных путях, причем один из них движется со скоростью v относительно другого. Как только вагоны проходят один мимо другого, ϵ и ϵ' высовываются в центральные окна и обмениваются рукопожатием. Но оказывается, что сами наблюдатели заряжены зарядами $+$ и $-$, поэтому при соприкосновении между ними проскакивает искра. Рассмотрим теперь свет от этой искры. Из средней точки, где находились экспериментаторы, часть света проходит в вагоны. Наблюдатель ϵ видит, что свет достигает передней и задней стен вагона одновременно (фиг. 167, а). Наблюдатель ϵ' также ви-

дит, что свет достигает стен его вагона одновременно (фиг. 167, б). Каждый из них считает, что находится в неподвижном вагоне и свет, по его мнению, распространяется от центра с постоянной скоростью c . Но ϵ может наблюдать и за распространением света в вагоне, где едет ϵ' . Он видит те же события, что и ϵ' , но, разумеется, не считает их одновременными, как об этом заявляет ϵ' . Пока свет успевает пройти половину вагона, сам вагон продвигается вперед. Наблюдателю ϵ кажется, что свету для достижения передней стены приходится идти дальше, а для достижения задней — меньше. Поэтому ϵ видит, что свет раньше достигнет задней стены, тогда как ϵ' заявляет, что свет попадает на обе стены одновременно¹⁾. (В свою очередь ϵ' видит, что свет достигает концов

¹⁾ Заметим, что это отклонение от одновременности не связано с упущением времени, необходимого световому сигналу, чтобы донести информацию до каждого из наблюдателей. Дело обстоит так, как будто каждый наблюдатель расположил вдоль своего вагона целый штат прекрасно натренированных помощников с часами, и эти помощники ведут наблюдения без запаздывания, а затем, собравшись, приносят свои записи наблюдателю, который сверяет их. Затем каждый из наблюдателей дает объяснение заявлению другого, что он видел, будто свет одновременно достиг концов его собственного вагона: «Что ни делает дурак, все он делает не так. Поставил в каждом конце вагона часы, которые показывают одно и то же время, когда на них падает свет. Это я тоже вижу. Но он ошибается, когда говорит, что его часы синхронизованы. Я вижу, что передние часы отстают от моих, стандартных, а задние часы — опережают. Я вижу, что до передней стены свету приходится идти дальше, мои часы, как и должно быть, показывают, что свет прибывает туда позднее. Но



Фиг. 167. Мысленный эксперимент,

вагона, в котором едет ϵ , в разные моменты, тогда как ϵ заявляет, что одновременно.) В обыденной жизни вы не встретите таких противоречий, ибо подобные споры возникают только в тех случаях, когда события очень близки по времени и очень удалены по расстоянию. Когда события P и Q разделены по времени интервалом короче, чем время распространения света между соответствующими точками, у наблюдателей с разным характером движения будут разные точки зрения: один будет видеть, что события P и Q одновременны, дру-

гой найдет, что P происходит раньше, чем Q , а третий — наоборот, что Q происходит раньше, чем P .

В представлениях теории относительности Эйнштейна время считается тесно переплетенным с пространством в так называемом пространстве-времени, разделение которого на пространство и время зависит от движения наблюдателя. Но если мы принимаем существование пространства-времени, то должны будем переосмыслить и наши представления о причине и следствии.

Причина и следствие

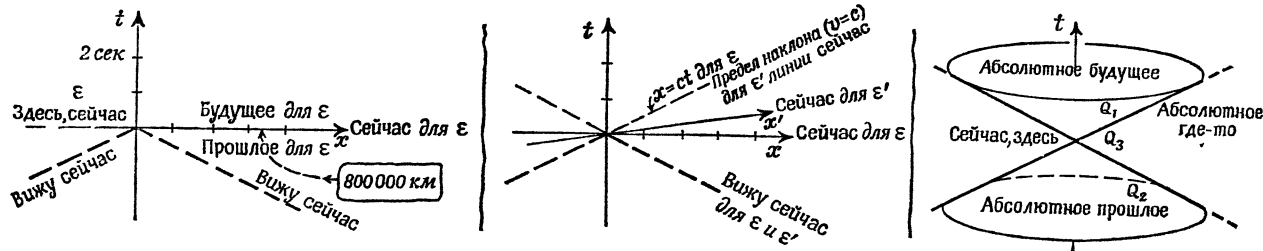
В вопросе о причинности в прежней науке было немало путаницы. Греки искали «первопричину». В последующем ученые искали непосредственную причину: «нагревание — причина плавления камня», «давление — причина течения жидкости», « α -частицы — причина образования ионов». Определить, что причина, а что следствие — не просто. Что означает: « P вызывает Q ». Самое лучшее сказать, что причина — это нечто, *предшествующее* следствию. Мы не придем к противоречию, если представим, что между ними существует некая связь.

Даже в обычных ситуациях (типа *напряжение и деформация* или *разность потенциалов и ток*) мы предпочитаем говорить, что события P и Q происходят одновременно. Мы по-прежнему ищем *соотношения*, которые бы выражали наши представления, но события P и Q обычно рассматриваются как братья, а не как родители и дети.

Теория относительности утверждает, что порядок *некоторых* событий может, по мнению разных наблюдателей, оказаться различным и каждый из них будет в равной степени прав. На фиг. 169 показано, как разные наблюдатели, для которых события P происходит *здесь и сейчас* (т. е. в *той же* точке и в *той же* момент), должны будут считать, что некоторые события (например, Q_1) происходят в *абсолютном будущем*, некоторые (Q_2) — в *абсолютном прошлом*, а некоторые (Q_3) — в *абсолютном где-то* (absolute elsewhere — как назвал их Эддингтон)¹⁾. Относительно их порядка очередности с событием P может

так как его часы несинхронизованы и идут медленнее моих, он не замечает опоздания. Ошибка в синхронизации часов как раз покрывает различие времен пролета из-за разных расстояний до концов его вагона». Как и в других подобных сравнениях, *каждый наблюдатель обвиняет другого в тех ошибках, которые приписываются ему самому.*

¹⁾ Приведенные на фиг. 169 причудливые рисунки крайне условны. В одномерном пространстве все события происходят на одной прямой линии, вдоль оси x . В лоренцевом мире считается, что относительная скорость ϵ и ϵ' очень высока. Искажение системы x' , t' показывает точку зрения наблюдателя ϵ . Сам ϵ' , разумеется, воспринимает свою систему как неискаженную, но зато ему кажется, что искажена система xt . Здесь невозможно показать эту важную симметрию, так что лоренцевы картинки должны восприниматься как иллюстрация. Буквальное толкование их может запутать читателя.



Фиг. 168. Диаграмма пространства-времени по Эддингтону.

Наблюдатель ϵ находится в начале координат, так же как и наблюдатель ϵ' , который быстро движется вдоль оси x относительно ϵ . Линия «*вижу сейчас*» описывается уравнением $x = -ct$ и отмечает все события, которые ϵ (или ϵ') видит *сейчас*. Зная величину скорости света c , ϵ следит за временем его распространения и размечает свою ось событиями, которые происходят сейчас вдоль оси x . Однако для той же линии «*вижу сейчас*» поправки ϵ' будут другими и линией «*сейчас*» он называет свою ось x' . Продолжение линии «*вижу сейчас*» в направлении положительного времени дает максимальный наклон, который получается у ϵ' для линии «*сейчас*», ибо ϵ' не может двигаться с относительной скоростью, большей c , а его линия поэтому никогда не может наклониться больше «световой» линии с наклоном c . Покрутите эту картинку вокруг оси t , и световая линия даст вам двойной конус.

Допустим, что событие P произошло в начале координат, в точке «*здесь, сейчас*», а другое событие — в точке Q . Если Q находится внутри верхнего светового конуса (Q_1), оно явно находится в *будущем* для всех наблюдателей. Аналогично всякое событие внутри нижнего светового конуса (Q_2) находится в *абсолютном прошлом*, для всех наблюдателей Q_2 происходит раньше P . Но Q_3 в пространстве между конусами может быть *будущим* для ϵ и тем не менее *прошлым* для наблюдателя ϵ' , так как его ось наклонна. Поэтому мы называем такую промежуточную область «*абсолютным где-то*». Если Q попадет туда, ни P , ни Q не могут быть *причиной друг друга*, они просто происходят в разных местах.

ПА́РЫ СОБЫТИЙ

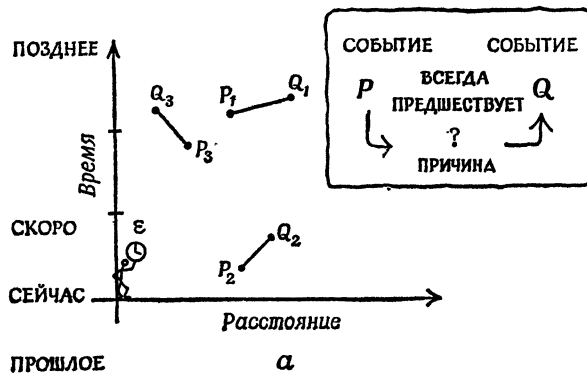
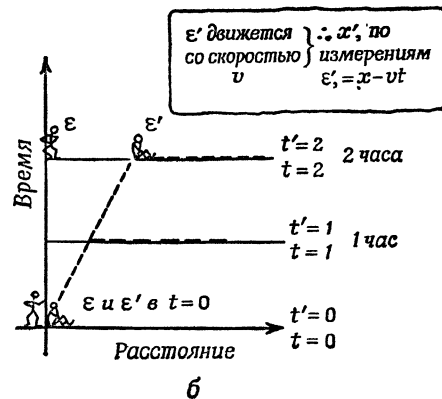


Диаграмма галилеева времени и расстояния



Фиг. 169. Диаграммы пространства (в одном измерении) и времени.

a — некое событие, происходящее на прямой линии (оси x), изображено точкой. Расстояние *вдоль* оси x показывает, где произошло событие, а *высота* показывает, когда оно произошло. Событие P предшествует по времени событию Q . Для некоторой пары событий можно утверждать, что P является причиной Q . *б* — для движущегося наблюдателя начало отсчета переносится вместе с ним. В галилеевой системе он пользуется тем же масштабом времени, что и неподвижный наблюдатель.



2

Время

x

$t=0$

$t'=0$

$t'=1$

$t'=2$

ϵ' в 2 часа

ϵ

1 час для ϵ'

α'

α

ПО ЛОРЕНЦУ

$$t' = \frac{t - \frac{xv}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

и

следовательно,

$$t' = 0 \rightarrow$$
$$t' = 1$$

и т.д.

наклоны

а — при преобразованиях Галилея линии каждого часа для двух наблюдателей одни и те же и параллельны линии $t=0$,
 а — преобразования Лоренца поворачивают ось одной координатной системы пространственно-времени по отношению к другой (хотя и на пренебрежимо малый угол, за исключением случаев, когда относительная скорость v и v' приближается к c).

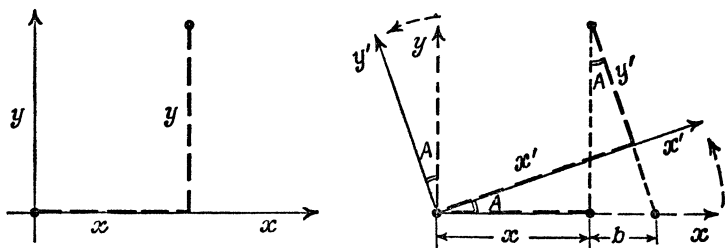
возникнуть разногласие между наблюдателями, движущимися по-разному.

Таким образом, нужно быть повнимательнее. Нетрудно установить причину и следствие в простейших случаях наподобие незрелого яблока и расстройства желудка или α -частицы и ионов, но следует соблюдать осторожность с событиями, близкими по времени и удаленными пространственно, не то как бы они не попали в *абсолютное где-то* по отношению друг к другу.

В атомной физике вы встретитесь с еще одним сомнением в отношении причины и следствия. Радиоактивные превращения оказываются подвластны чистой случайности: время существования индивидуального атома непредсказуемо. В последней главе вы увидите, что природа переносит частичную невозможность предсказаний на все наши знания, снабжая индивидуальные атомные явления некой неопределенностью, в свете которой бессмысленно ожидать однозначных следствий при определенной «причине».

Преобразования Лоренца как вращения

Фиг. 168 и 169 позволяют пролить новый свет на преобразования Лоренца, если сравнить их с простым вращением осей x и y . Воспользуемся алгеброй и найдем «преобразования», связывающие старые координаты точки с новыми координатами x' , y' той же точки.



Фиг. 170.

Спроектируем точку на оси x и y (фиг. 170). Повернем теперь оси на угол A (вокруг оси z). По отношению к новым осям координаты точки будут x' , y' . Обозначим символом s наклон новой оси x , так что $s = \operatorname{tg} A$. Теперь видно, что

$$\begin{aligned} x' &= (x+b) \cos A = (x+y \operatorname{tg} A) \cos A \\ &= \frac{x+sy}{\sec A} = \frac{x+sy}{\sqrt{1+\operatorname{tg}^2 A}}, \end{aligned}$$

т. е.

$$x' = \frac{x+sy}{\sqrt{1+s^2}}.$$

Подобным же образом $y' = (y-sx)/\sqrt{1+s^2}$.

Преобразования при простом вращении осей показывают, что квадратный корень играет здесь ту же роль, что и в преобразованиях Лоренца. Действи-

тельно, мы получим лоренцеву форму преобразований, если вместо y возьмем t , умноженное на постоянную c и на i [квадратный корень из (-1)], а вместо наклона s возьмем $i(v/c)$. Если $y = ict$, $y' = ict'$, а $s = iv/c$, то преобразования вращения превратятся в преобразования Лоренца. Проверьте это. Отсюда видно, что преобразования Лоренца можно рассматривать как расслоение пространства-времени линиями разного наклона для разных наблюдателей.

Инвариантный «интервал» между двумя событиями

Определим «интервал» между двумя событиями (x_1, t_1) и (x_2, t_2) по теореме Пифагора:

$$R^2 = (x_1 - x_2)^2 + (ict_1 - ict_2)^2.$$

Затем можно записать выражение для «интервала» R' для другого наблюдателя, который в своих координатах связывает те же два события в точках (x'_1, t'_1) и (x'_2, t'_2) . Воспользуемся преобразованиями Лоренца и выразим R' через координаты первого наблюдателя. Тогда мы обнаружим, что R' совпадает с R . Преобразования Лоренца оставляют «интервал» неизменным. Это и составляет утверждение теории относительности — измерения s всегда дают одну и ту же ее величину.

Роль скорости s иллюстрируется историей, предложенной Джоном А. Уилером. Допустим, что обитатели некоего острова проводят все свои измерения в прямоугольной системе координат, но расстояние по оси, идущей с севера на юг, они измеряют в километрах, а с запада на восток — в метрах. Затем неожиданный сдвиг магнитного поля Земли на угол A вынуждает их повернуть свои оси в новом направлении. Однако они по-прежнему продолжают мерить расстояния $S' - Ю'$ в километрах, а $S' - В'$ в метрах. Попытавшись вычислить расстояние между двумя точками по теореме Пифагора $R^2 = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2$, они обнаруживают, что в новых координатах R стало другим. Затем они открывают, что для обоих наборов осей значение R получается одним и тем же (которое к тому же полезно), если определить $R^2 = (\Delta x)^2 + (1000\Delta y)^2$. Этот «таинственный» множитель 1000 соответствует s в релятивистском интервале. Вывод таков: s не столько таинственная предельная скорость, сколько множитель, связанный с единицами измерения, который говорит, что время и расстояние не отличаются в корне друг от друга, а образуют однородное множество, в котором и то и другое можно измерять метрами.

Существует ли система отсчета, связанная с неподвижным пространством?

Итак, мы построили специальную теорию относительности с ее новой геометрией и физикой пространства и времени, с ее часами и метрами (основными приборами физики), которые своими изменениями при переходе в новую систему открывают универсальный характер и постоянство скорости света — предел скорости движущихся тел — и выявляют единую форму физических законов для всех наблюдателей, движущихся друг относительно друга с постоянной скоростью, тем самым безвозвратно сокрушая наши надежды на всякое абсолютное движение и системы отсчета, связанные с неподвижным пространством, вернее, объявляя вопрос о существовании таких систем лишенным всякого смысла.

Высшая ценность математики как языка науки.

Математическая форма и красота

Язык алгебры правдив, точен и даже плодотворен, но не обречен ли он навечно оставаться скучной, неинтересной прозой, никогда не способной подняться до высот поэзии? Большинство математиков отвергают это, считая математику прекрасной. Нужно научиться извлекать наслаждение из ее формы и элегантности, как и в случае поэзии. В качестве примера покажем, как можно придать красоту системе двух уравнений. Начнем с системы

$$\begin{aligned}2x+3y &= 9, \\ 4x-2y &= 10.\end{aligned}$$

С помощью простых уловок можно избавиться от y и найти $x=3$, а после этого $y=1$. Но это слишком частный пример. Давайте обобщим его, заменив коэффициенты 2, 3, 9 и т. д. буквами a , b , c и т. д. Таким образом,

$$ax+by=c, \quad dx+ey=f.$$

Потрудившись немного, находим $x=(ec-fb)/(ae-db)$. За тем, чтобы определить y , требуются новые ухищрения. Но это дает нам возможность решить как прежде, так и все подобные ему уравнения простой подстановкой числовых коэффициентов a , b , c и т. д. Если нам не нужно решать множество таких уравнений, вряд ли на это стоило бы тратить время и до поэзии здесь далеко, как до неба. Но давайте рассуждать более систематично. Давайте считать x и y однородными вещами и отметим это сходство, переименовав их в x_1 и x_2 . Чтобы еще больше подчеркнуть это сходство, будем писать a_1 , a_2 , a_0 вместо a , b , c и соответственно $a_1x_1+a_2x_2=a_0$. Кроме этого, у нас есть коэффициенты второго уравнения. Можно обозначить их a'_1 и т. д. Но и в этом случае оба уравнения не будут вполне симметричными. Поэтому обозначим первый набор коэффициентов a_1 и т. д., а второй a'_1 и т. д. Тогда

$$\begin{aligned}a'_1x_1+a'_2x_2 &= a'_0, \\ a''_1x_1+a''_2x_2 &= a''_0.\end{aligned}$$

Эта запись выглядит изящной, но много ли в таком изяществе толку? Разрешим уравнение относительно x_1 . Получим

$$x_1 = \frac{a'_0 a''_2 - a''_0 a'_2}{a'_1 a''_2 - a''_1 a'_2},$$

а вот и толк: нам не нужно разрешать уравнение относительно x_2 или y . Симметрия сразу дает нам ответ. Заметьте, что x_1 и x_2 (старые x и y) и их коэффициенты отличаются только индексами 1 и 2. Если мы всюду заменим индексы 1 на 2, получится то же самое уравнение, а следовательно, и те же решения. Произведя эту замену в решении

$$x_1 = \frac{a'_0 a''_2 - a''_0 a'_2}{a'_1 a''_2 - a''_1 a'_2},$$

мы получим

$$x_2 = \frac{a'_0 a''_1 - a''_0 a'_1}{a'_2 a''_1 - a''_2 a'_1}.$$

Итак, мы без труда получили результат для x_2 (старого y). Экономия как будто небольшая, но представьте себе, как увеличилась бы сложность, если бы мы имели дело, скажем, с пятью уравнениями и пятью неизвестными. В такой симметричной записи системы мы просто решаем относительно одного неизвестного, а остальные четыре решения пишем исходя из соображений симметрии. Такая запись *проста*, экономична и красива с точки зрения математики. Более того, новая запись уравнений и ответов обща и универсальна. В некотором смысле — она ковариантна. Такая симметричная запись созвучна идеям Максуелла и Эйнштейна.

Это лишь небольшой шаг на пути поиска поэзии математического языка — всего лишь подходящий размер стиха. Следующим шагом должны быть не симметричная *запись*, а симметричные *методы*, например «детерминанты». Когда профессиональный математик разрабатывает обоснования доказательства своих методов, он создает логические построения и пишет выражения, которые для него столь же великолепны, как и лучшие из стихов.

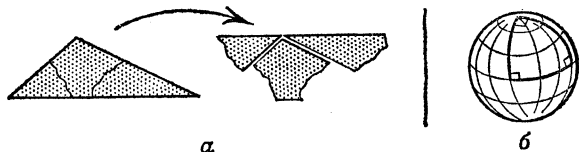
Геометрия и наука: истина и общая теория относительности

Таким образом, математика далеко выходит за рамки рабочей арифметики и некоего «автомата». Для более полного расцвета и развития она даже избавляется от скучных определений и некоторых ограничений логики, по тем не менее вся математическая схема основана на собственных исходных положениях; сердца ее исследователей пленяют *числа, точки, параллельные линии, векторы* ... Чистая математика — это наука в башне из слововой кости. Результаты, полученные только с помощью правил логики, будут автоматически верны в той мере, в коей верны первоначальные предположения и определения. Удовлетворяет ли реальный мир этим предположениям — на первый взгляд это вопрос эксперимента. Разумеется, нам не следует доверять предположениям только потому, что они кажутся разумными и очевидными. Однако они могут больше напоминать определения тех действий, в случае которых математика в рамках этих определений может их языком описывать мир.

Мы привыкли думать, что после того, как математики создали свой мир пространства и чисел, нам осталось ставить опыты и выяснять, насколько с ним согласуется наш мир. Евклид, например, выдвинув предположения относительно точек, линий и т. д., вывел из них непротиворечивую геометрию. На первый взгляд из грубого сравнения с реальными окружностями и треугольниками, нарисованными на бумаге или начерченными на земле, кажется, что результаты системы Евклида правильно описывают природу. Однако чувствуется, что для проверки, насколько правильно Евклид выбрал свои предположения и точно ли они воспроизводят природу, нужны все более и более точные эксперименты. Например, будут ли три угла треугольника составлять точно 180° ¹⁾. Релятивистская механика и размышления о строении Вселенной

¹⁾ Для вас это, вероятно, очевидно, ибо вы целиком полагаетесь на доказательство Евклида, на его авторитет. К тому же вы можете убедиться в правильности этого утверждения, взяв бумажный треугольник, оторвав углы и соединив их (фиг. 171). Допустим, однако, что мы живем на огромном шаре, не зная об этом. Маленькие треугольники, уместающиеся в классной комнате, дадут в сумме 180° . Но огромный треугольник будет иметь большую сумму углов. Например, большой треугольник с вершиной в 90° на Северном полюсе будет иметь два прямых угла у основания на экваторе.

поднимают серьезный вопрос о выборе наиболее подходящей геометрии. Математики давно знают, что евклидова геометрия — одна из нескольких возможных, которые совпадают в малом масштабе, но радикально отличаются по своей физической и философской природе в большом масштабе.



Фиг. 171. Разорванный треугольник (а) и треугольник на сфере (б).

Специальная теория относительности имеет дело с наблюдателем, движущимся с постоянной скоростью относительно приборов или другого наблюдателя. После нее Эйнштейном была развита общая теория относительности, которая имеет дело с ускоряющимися системами.

Что же такое общая теория относительности и как она влияет на наши представления о физике и геометрии?

Эйнштейновский принцип эквивалентности

К общей теории относительности Эйнштейна привел вопрос: «Может ли наблюдатель в падающем лифте или ускоряющемся поезде установить, что он действительно ускоряется?» Конечно, он заметил бы появление странных сил (как и в опытах с тележкой на роликах при проверке соотношения $F=ma$ в ускоряющемся вагоне ¹⁾. Там на тележку действуют силы, которые приводят к отклонению от закона $F=ma$). Но можно ли какими-то опытами отличить ускорение системы отсчета от нового поля силы тяжести? (Если бы плотник построил в таком ускоряющемся вагоне лабораторию с надлежащим наклоном, то наблюдатель снова обнаружил бы, что закон $F=ma$ справедлив, но величина g в этом случае была бы другой.) Поэтому Эйнштейн предположил, что никакие локальные эксперименты (ни механические, ни электрические, ни оптические) никогда не могут сказать наблюдателю, вызваны ли наблюдаемые им силы ускорением или локальным полем силы тяжести. Затем Эйнштейн сказал: «Законы физики должны иметь одну и ту же форму для ВСЕХ наблюдателей, включая тех, кто движется с ускорением». Другими словами, Эйнштейн потребовал, чтобы все законы физики были ковариантны относительно любых переходов от одной системы отсчета (или лаборатории) к другой. В этом суть общей теории относительности: все физические законы должны сохранять свою форму.

Эквивалентность механического поведения в поле силы тяжести и ускоренной системе отсчета давно была очевидна. Величайшим вкладом Эйнштейна было предположение об их полной эквивалентности, а именно предположение, что даже на оптические и электрические эксперименты поле силы тя-

¹⁾ См. задачи 28 и 29, гл. 7 (т. 1, стр. 299).

жести будет влиять подобно ускорению системы отсчета. «Это утверждение дало долгожданную связь между гравитацией и остальной физикой...»¹⁾.

Локальное ускорение $\equiv$ гравитация (поле силы тяжести)

Принцип эквивалентности существенно меняет наши взгляды на движение и геометрию.

1. *Локальная физика ускоряющегося наблюдателя.* Если принцип эквивалентности верен, все эффекты, наблюдаемые в ускоренной лаборатории, можно описать дополнительным силовым полем. Если ускорение лаборатории равно a м/сек², мы можем считать лабораторию покоящейся, и вместо этого приписать действие на каждую массу m кг дополнительной силы — ma ньютон, силовому полю напряженностью — a ньютон/кг. При учете этого поля должны быть справедливы все правила обычной механики, точнее, та модификация, внесенная Лоренцем в механику Ньютона и геометрию Евклида, которая составляет специальную теорию относительности.

Пример А

Экспериментаторы в ускорящемся железнодорожном вагоне или разгоняющейся ракете обнаруживают, что законы Ньютона применимы при малых скоростях при условии, что в дополнение ко всем видимым силам на каждую из масс m действует направленная противоположно ускорению сила — ma , обусловленная эквивалентным силовым полем²⁾.

Движущиеся с большими скоростями тела в такой лаборатории кажутся более массивными и т. п., в точности как это предсказывает специальная теория относительности.

Пример Б

В лифте, падающем с ускорением a , экспериментатор, измеряя вес

на пружинных весах, получит значение, соответствующее полю силы тяжести напряженностью $(g - a)$ (см. задачу 10 в гл. 7, т. 1, стр. 285).

Пример В

В свободно падающем ящике сила, действующая со стороны эквивалентного поля на массу m , будет направлена вверх. Так как она полностью компенсирует вес тела mg , направленный вниз, нам кажется, что наступила невесомость. То же самое происходит и в опытах внутри ракеты, когда ее двигатели выключаются, и в опытах на спутнике, движущемся по орбите вокруг Земли: притяжение Земли здесь не чувствуется, ибо вся лаборатория ускоряется как целое.

¹⁾ Edmund Whittaker, *From Euclid to Eddington*, Cambridge, 1949.

²⁾ Свыше двухсот лет назад французский философ и математик Даламбер сформулировал общий принцип решения задач с учетом ускоренного движения: *добавьте* ко всем известным силам, действующим на ускоряющуюся массу m , дополнительную силу — ma , а затем рассматривайте равновесие массы m . Добавляя «даламберовы силы» для всех тел сложной системы, можно превратить динамическую задачу вычисления сил или движения в статическую задачу о равновесии сил. Этот прием часто применяется инженерами, однако такой профессиональный трюк может сбить с толку, так что при обучении мы избегаем его. Он входит в набор «лекарств от головной боли для инженеров», о которых упоминалось в гл. 21.

Пример Г

Во вращающейся лаборатории введение направленного наружу

силового поля напряженностью v^2/R сводит локальные особенности механики к случаю стационарной лаборатории.

2. *Интерпретация силы тяжести.* Любое реальное поле силы тяжести можно интерпретировать как локальную модификацию пространства-времени переходом в такую ускоренную систему, где поле исчезнет. Этот переход не помогает вычислениям, но указывает на новый смысл гравитации, который будет обсуждаться в следующем разделе.

3. *Невесомость.* Если поле силы тяжести действительно эквивалентно ускорению системы, то мы можем ликвидировать его, придавая нашей лаборатории подходящее ускорение. Обычная сила тяжести — притяжение Земли — действует вертикально вниз. Она эквивалентна направленному вверх ускорению g нашей системы. Если же мы позволим нашей лаборатории падать вертикально вниз, то не обнаружим в ней действия силы тяжести. В нашей лаборатории имеются два ускорения: «реальное» ускорение падающего тела и противоположное ему ускорение, заменяющее поле силы тяжести. Они в точности компенсируют друг друга и получается эквивалент *стационарной лаборатории в отсутствие гравитации*. Это попросту означает, что если лаборатория свободно падает, то в ней не чувствуется земного притяжения. Практически это осуществимо при космических полетах или спуске в свободно падающем лифте. В подобной ускоряющейся системе отсчета локально устранены все следы поля силы тяжести Земли или Солнца ¹⁾. Теперь можно предоставить тело самому себе и понаблюдать за его поведением. Его путь в пространстве-времени оказывается прямой линией, и мы ожидаем, что тело будет подчиняться простым механическим законам. У нас получилась локальная инерциальная система отсчета.

4. *Искусственная сила тяжести.* Напротив, создавая большие реальные ускорения, можно получить мощное силовое поле. Если верить принципу эквивалентности, то можно ожидать, что это силовое поле будет действовать на вещество подобно очень сильному гравитационному полю. С этой точки зрения центрифуга тысячекратно увеличивает значение g .

5. *Символические эксперименты.* Для наблюдателя, движущегося с ускорением a , каждая масса m° , помимо других сил, действующих на нее со стороны известных тел m^a , кажется подверженной действию силы, противоположной ускорению. В поле силы тяжести напряженностью g масса $m^\dagger$ притягивается с силой $m^\dagger g$. Здесь m° обозначает инертную массу, которая входит в формулу $F=ma$, а $m^\dagger$ обозначает гравитационную массу в законе всемирного тяготения $F=GMm/d^2$. Принцип эквивалентности гласит, что поле силы тя-

¹⁾ Вот почему гравитационное притяжение Солнца «не создает» заметного поля силы тяжести, если мы движемся вместе с Землей по ее орбите вокруг Солнца. Заметный эффект возникает только при условии, что инертная и гравитационная массы для разных веществ не в точности пропорциональны. Малейшее различие упорно ищется, и если его обнаружат, это окажет огромное влияние на нашу теорию.

жести напряженностью g можно заменить противоположно направленным ускорением наблюдателя g :

$$m\ddot{x} + g \text{ должно быть равно } m^0g, \text{ т. е. } m\ddot{x} = m^0g.$$

Принцип эквивалентности требует, чтобы гравитационная масса была равна инертной, и символический эксперимент давно доказал, что так оно и есть. Как вы увидите из последующего, Эйнштейн в своей общей теории относительности придал этому равенству двух сортов масс более глубокий смысл.

Общая теория относительности и геометрия

В малой области пространства-времени поле силы тяжести Земли, как и любые другие гравитационные поля, практически однородно. Поэтому в локальном опыте мы можем «убрать» притяжение, дав нашей лаборатории возможность свободно падать. При этом она будет подобна инерциальной системе в отсутствие гравитационных полей, т. е. предоставленные самим себе тела будут оставаться в ней в покое или двигаться по прямой, а приложив к ним силу, мы обнаружим, что $F=ma$. Однако в большем масштабе, скажем в пространстве около Земли или около Солнца, мы должны использовать множество различных ускорений, чтобы устроить силу тяжести в каждой из локальных лабораторий. Чтобы согласовать прямолинейное движение в соответствии с первым законом Ньютона с его продолжением в соседней лаборатории, которая также свободно ускоряется, мы должны будем «искривить» траекторию. При переходе из лаборатории в лабораторию около тяготеющей массы придется изгибать ее еще больше. Как это объяснить? Вместо того чтобы говорить «мы обнаружим здесь, помимо всего, силу тяжести», мы могли бы сказать: «Евклидова геометрия не соответствует реальному миру вблизи массивной Земли и Солнца». Общая теория относительности выбирает второе. Как и при создании специальной теории относительности, Эйнштейн искал простейшую геометрию, которая удовлетворяла бы новому предположению о том, что запись законов физики *всегда* должна быть одинаковой. Он пришел к геометрии общей теории относительности, в которой сила тяжести как некая странная сила, порождаемая массой, исчезла, уступив место возмущению пространства-времени в окрестности масс.

«С незапамятных времен физики и чистые математики работали в определенном согласии друг с другом относительно их доли участия в изучении природы. Сначала приходили математики и, проанализировав свойства пространства и времени, строили предварительную геометрию и кинематику (чистое движение). Затем, когда сцена была подготовлена, физики выводили действующих лиц: материальные тела, магниты, электрические заряды, свет и так далее, и представление начиналось. Однако, согласно революционной концепции Эйнштейна, действующие лица теперь сами готовят подмости, появляясь на них: геометрия уже не предшествует физике, а неразделимо слита с ней в единый предмет. Свойства пространства в общей теории относительности зависят от присутствия материальных тел и их энергии...»¹⁾.

Однако какая же геометрия более правильна — старая или новая? Вернемся к нашей точке зрения на математику как послушного слугу. Нельзя

¹⁾ Edmund W h i t t a k e r, From Euclid to Eddington, Cambridge, 1949, p. 117.

ли для описания физического мира воспользоваться *любой* геометрией, так сказать, деформировать картину мира, чтобы втиснуть его в геометрию? Тогда нашей задачей будет не нахождение *правильной* геометрии, а выбор *простейшей или наиболее удобной*, которая описывала бы мир с минимальным искажением. Если это так, то мы должны понять, что, *выбирая* геометрию, мы *имеем дело* с нашей Вселенной, и если мы для подготовки безжалостно корежили ее, то это не пройдет нам даром.

Если бы наш мир представлял собой, например, апельсиновую кожуру, то подходящей моделью для него был бы шар. Если же мы подойдем к нему с непоколебимой верой в плоскую геометрию, то должны растянуть кожуру на плоском столе так, чтобы она плотно прилегла к его поверхности. Тогда мы бы обнаружили, что клетки кожицы у внешнего края стали больше, но вынуждены были бы объявить это законом природы. Мы бы обнаружили странные силы, пытающиеся оторвать середину кожицы от стола, — снова «закон природы». Если мы заботимся об упрощении наших представлений о природе, то поведение апельсиновой кожицы подсказало бы нам в качестве модели пространства не плоскую, а сферическую геометрию. Все это звучит странно, но так оно и есть. Именно такие рассуждения в рамках трех- и четырехмерного пространства, вместо двумерного, использованы общей теорией относительности. Странные гравитационные силы могут быть непосредственным результатом стремления описать природу неподходящей геометрией — прекрасно развитой системой Евклида. Если бы мы выбрали другую геометрию, в которой материя возмущала бы вблизи системы отсчета, то гравитация из удивительного набора сил превратилась бы в простой вопрос геометрии. Теперь уже не нужно говорить, что ядро из-за силы тяжести летит, согласно старой геометрии, по «кривому» пути. Вместо этого мы можем считать, что оно следует по пути, который в новой геометрии представляет собой прямую линию в пространстве-времени, искаженном присутствием Земли.

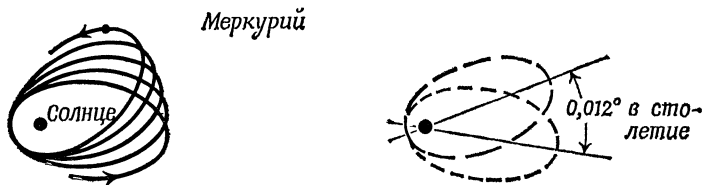
Это было бы всего лишь простым изменением точки зрения (и как ученые, мы едва ли беспокоились бы об этом), если бы не открывало нам глаза на новые стороны природы или не улучшало понимания старых. А это так. С подобной геометрической точки зрения «криволинейный» путь свободно движущихся тел присущ новой геометрии пространства-времени и *всякое* летящее с данной скоростью тело, большое или маленькое, должно следовать по одному и тому же пути. Обратите внимание, как исчезает неожиданность символического эксперимента. Долговечная загадка равенства гравитационной и инертной масс оказалась решенной. Этим равенством, представляющим собой фундаментальное свойство природы, пренебрегали на протяжении веков, пока Эйнштейн не объявил его свойством пространства-времени, обусловленным присутствием вещества.

Даже световые лучи подобно пуле, движущейся со скоростью света, должны распространяться по криволинейному пути. В окрестности Земли эта кривизна незаметна, но лучи звезд, проходящие вблизи Солнца, должны отклоняться на угол около $0,0005^\circ$, измерение которого под силу лишь современным приборам. Фотографии, сделанные при полном солнечном затмении, показывают, что положение звезд, близких к краю Солнца, кажется сдвинутым на угол $0,0006^\circ$. С традиционной («классической») точки зрения Солнце создает поле силы тяжести, которое, по-видимому, видоизменяет прямолинейное распространение света в евклидовой геометрии. С точки зрения общей теории относительности мы заменяем силу тяжести Солнца таким локальным искажением геометрии, что по сравнению с простой евклидовой формой свет кажется нам «более медленным». Таким образом, лучи немного искривляются вблизи

Солнца наподобие искривления лучей горячим воздухом над шоссе, когда возникает мираж, но в другую сторону.

Обнаружив простоту и плодотворность этой точки зрения, особенно когда она выливается в простейшую математическую форму, мы принимаем ее. Обычные лабораторные эксперименты показывают, что евклидова геометрия дает достаточно простое и точное описание пространства. Но в астрономических масштабах с громадными гравитационными полями мы должны либо пользоваться новой геометрией (в которой сетка «прямых линий» в пространстве-времени кажется нам слегка искривленной), либо как-то видоизменять законы физики. Современная наука предпочла изменения в геометрии. Это позволяет не только придать законам физики простой и универсальный вид, но вместе с тем иногда обнаруживать новые свойства.

Приспосабливая гравитацию к новой геометрической точке зрения, Эйнштейн обнаружил, что в простейшей, наиболее правдоподобной форме она приводит к закону, несколько отличному от закона всемирного тяготения Ньютона.



Фиг. 172. Движение планеты Меркурий.

Он вовсе не опроверг «закон Ньютона», а предложил лишь более правильную его модификацию, хотя основана она на радикальном изменении точки зрения. Не следует думать, что закон справедлив только потому, что предложен великим человеком или облечен в изящную математическую форму. Он рассматривается нами как блестящая догадка великого ума, чрезвычайно чуткого к звучанию правды реального мира. Мы воспринимаем его как перспективное и весьма правдоподобное предположение, но именно поэтому должны подвергнуть его безжалостной проверке. Предложенные Эйнштейном изменения предсказаний Ньютона, столь фундаментальные по своей природе, обычно дают слишком малый эффект, чтобы привести к какой-то разнице и в эксперименте и даже в большинстве астрономических измерений. Однако в случае быстрого движения планеты Меркурий по своей орбите они должны быть заметны. Ньютон предсказывал для орбит простой эллипс, искаженный возмущениями других планет, которые могут быть вычислены и наблюдаемы. Общая теория относительности предсказывает и другое движение — очень медленный поворот большой оси эллипса на $0,0119^\circ$ в столетие. Это слабое движение было уже известно до предсказания Эйнштейна. Его открыл Леверье. Скорость его (т. е. небольшой остаток после учета возмущений) оказалась близка к $0,012^\circ$ в столетие.

Такой взгляд на гравитацию позволяет астрономам обсуждать геометрию всего пространства и ставить вопросы о том, бесконечна Вселенная или ограничена своей собственной геометрической кривизной (наподобие сферы). Когда-нибудь мы, быть может, будем способны решить их.

В общей теории относительности еще немало трудностей и сомнений. Даже когда мы доверчиво опираемся на эту теорию, имея дело с движением

Меркурия или красным смещением в свечении массивных звезд, то, *по-видимому*, должны связывать наши вычисления с *какой-то* системой отсчета — быть может, с отдаленными областями пространства вдали от тяготеющей материи, а быть может, с центром тяжести нашей Вселенной. Таким образом, пространство при нашем рассмотрении *может быть* «размечено» некоего рода абсолютными «верстовыми столбами». Однако это сомнение, эта угроза для мощной теории ничуть не пугает мудрого ученого. Он имеет ее в виду, веря в перспективность своих умозаключений.

Новая математика в ядерной физике

В атомной и ядерной физике математика тоже берет свое. Вместо картинки с твердыми шариками-электронами, которые вращаются вокруг тоже твердого шарика — ядра, мы выражаем наши сведения об атомах в математической форме, для которой нельзя нарисовать простой картины. Для такого описания используется аппарат, специально приспособленный для этой цели, на котором стоит привычное математическое «клеймо» распространения волн. Несмотря на свою чисто математическую форму, оно приводит ко множеству плодотворных предсказаний — от прочности металлической проволоки и химической энергии до поведения радиоактивных ядер.

Мы вновь видим, что математика с ее строгими рассуждениями и доказательствами предлагает физике ясную форму, которая помогает нашим размышлениям. Однако теперь это уже далеко не слуга, а скорее лорд-канцлер, стоящий позади трона королевы-науки и предлагающий ей законы. Кроме того, мы можем сравнить математику с выдающимся архитектором, проектирующим здание, в котором еще более пышно расцветет древо Науки.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ЧАСТЬ ВТОРАЯ. НАУКА О ЗЕМЛЕ И ВСЕЛЕННОЙ. ВОЗНИКНОВЕНИЕ НАУЧНЫХ ТЕОРИЙ

ГЛАВА 12. ЛЮДИ И НЕБЕСА	7
Возникновение человека (7). Развитие человека (9). Возникновение астрономии (9). Астрономия и религия (12). Наука, магия и религия (12). Наука — искусство понимать природу (14).	
ГЛАВА 13. ФАКТЫ И ПЕРВЫЕ ШАГИ НАУКИ	16
Факты (16). Солнце — указатель (16). Звезды (18). Солнце и звезды (21). Эклиптика и зодиак (22). Луна (26). Затмения (26). Календарь (29). Планеты (31). Зодиак (31). Планеты и их движение (31). Эпициклоида (36). Наблюдения (37). Планеты и звезды (37). Парал- лакс (38). Ранние ступени прогресса (39). Астрономия в эпоху древних цивилизаций (39). Самаритяне, вави- лоняне и халдеи (народности, населявшие Месопотамию) (39). Египтяне (40). Греки (41).	
ГЛАВА 14. АСТРОНОМИЯ У ГРЕКОВ. ВЕЛИКИЕ ТЕОРИИ И НАБЛЮДЕНИЯ	43
Теория — собрание фактов; предсказание явлений (43). Древнегреческая астрономия (44). Научная школа в Александрии (62). Измерения размеров и расстояний (64). Размеры Земли (66). Размеры Луны и ее расстояние от Земли (68). Размеры Солнца и его расстояние от Земли (71). Более поздние теории (75).	
ГЛАВА 15. ПРОБУЖДЕНИЕ ЛЮБОЗНАТЕЛЬНОСТИ	85
ГЛАВА 16. НИКОЛАЙ КОПЕРНИК (1473—1543)	90
Определение радиусов орбит (97).	

ГЛАВА 17. ТИХО БРАГЕ (1546—1601) 107

Революция, совершенная теорией Коперника (107). Тихо Браге (112). Новая звезда (116). Большая обсерватория Ураниборг (117). Печали и волнения (124). Новая обсерватория в Праге (125).

ГЛАВА 18. ИОГАНН КЕПЛЕР (1571—1630) 128

Правильные многогранники (132). Исследование Марса (137). Определение орбиты Земли в пространстве и времени (138). Переменная скорость планет. Второй закон (140). Орбита Марса. Первый закон (141). Третий закон (143). Законы Кеплера (146). Вывод третьего закона (147). Воображаемая «Задача Кеплера» (148). Труды Кеплера (150).

ГЛАВА 19. ГАЛИЛЕО ГАЛИЛЕЙ (1564—1642) 154

Галилей и новая наука (155). Жизнь и деятельность Галилея. Пиза (157). Падуя (158). Астрономия Коперника (159). Учение Галилея о движении (160). Скорость у подножия холма (164). Правило «с горки на горку» (165). Первый закон движения Ньютона (167). Независимость движения (167). Отъезд из Падуи (168). Телескоп (169). Спутники Юпитера (172). Возвращение в Пизу и Флоренцию (175). Неприятности (176). Великий диалог (178). Спор науки с церковью (182).

ГЛАВА 20. СЕМНАДЦАТЫЙ ВЕК 186

Тысячелетие астрономии (186). Эпоха Возрождения (187). «Прогресс» (188). Семнадцатое столетие (188). Наука (192). Новая философия Декарта (197). Фрэнсис Бэкон (199). Развитие теории; необходимость современной науки (200).

ГЛАВА 21. ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ 202

Орбитальное движение (202). Ускорение тела, движущегося по окружности (205). Вывод формулы $a=v^2/R$ (207). Два важных вопроса (211). Ускорение без изменения скорости (215). Центробежная или центростремительная сила? (217). Центробежная сила. Mv^2/R (217). Центробежная сила и средство от головной боли для инженеров (225).

ГЛАВА 22. ИСААК НЬЮТОН (1642—1727)	239
--	-----

Жизнь и труды Ньютона (239). Законы движения (243). Прежние представления о движении (246). Законы Ньютона: Реальность или Определения? (247). Ньютон и движение планет (249). Объяснение Ньютона (253). Всемирное тяготение (253). Третий закон Кеплера (256). Второй закон Кеплера (258). Второй закон Кеплера и момент количества движения (262). Плодотворная теория (267). Объяснение прецессии гироскопа (275). Методы Ньютона (289). Идеи Ньютона (290).

ГЛАВА 23. ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ	296
--	-----

Измерение величины G (297). Результаты измерения G (299). Современное использование эксперимента Кавендиша (301). Рассуждения (302). Самое существенное — это время (302).

ГЛАВА 24. ТЕОРИИ И НАУЧНЫЕ МЕТОДЫ	306
---	-----

Построение системы научных знаний (310). «Демоны» (311). Хорошая теория (314). Дедуктивная теория и научное познание (315). Научный метод (315). Научные методы (317). Научный метод: чувство уверенности (318). Понимание — это полуфабрикат. Модели (320). «Решающие эксперименты» (321). Интеллектуальное удовлетворение (322).

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ. МОЛЕКУЛЫ И ЭНЕРГИЯ

ГЛАВА 25. ВЕЛИКАЯ ТЕОРИЯ — КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ГАЗОВ	327
--	-----

Закон Бойля (328). Теория (330). Трудности простейшей теории (339). Молекулярный хаос (340). Более элегантный вывод (341). Предсказания кинетической теории газов (343). Существуют ли молекулы? (344). Броуновское движение (345). Можно ли увидеть молекулы? (346). Измерение скорости молекул (348). Скорость молекул; экспериментальные данные (350). Прямые измерения (353). Скорости молекул в других случаях. Диффузия (354). Диффузия (355). Температура (361). Развитие кинетической теории газов (361). Что такое mv^2 ? (361).

Энергия и топливо (364). «Работа» и измерение энергии (367). Топливо и цивилизация (372). Механизмы (372). Наука и слепые правила (381). Гидравлический пресс (382). Наклонная плоскость (384). Что же такое энергия? (385). Единицы энергии (385). Формы энергии (386). Вечный двигатель (388). Измерение различных форм энергии (392). Потенциальная энергия силы тяжести (392). Энергия упругой деформации (энергия, запасенная в растянутой пружине, и т. п.) (393). Кинетическая энергия. Энергия движения (394). Единицы измерения кинетической энергии (396). Теплота (396). Теплота и молекулы (398). Химическая энергия (398). Пища — источник химической энергии (400). Усталость (402). Другие формы молекулярной энергии (402). Энергия вращения (403). Электрическая энергия (404). Магнитная энергия (405). Электромагнитная энергия (406). Энергии волн (407). Ядерная энергия (408). Для чего нам нужна энергия (409). Возможность получения энергии: кинетическая энергия упорядоченного и хаотического движения (419). Беспорядок, информация, энтропия (420). Источники энергии (422). Примеры вычисления энергии. Вычисление потенциальной энергии (424). Замечание о нулевом уровне потенциальной энергии (426). Замкнутые системы (433). Сохранение механической энергии: $E_{\text{пот}} + E_{\text{кин}} = \text{const}$ (433). Мощное средство (434). Благополучие и счастье человечества (435). Масса, материя и энергия; $E = mc^2$ (436). Почему мы все же верим, что $E = mc^2$? (438). Сохранение вещества и энергии (445). Энергия, заключенная в веществе (445). Другие формы энергии? (445).

ГЛАВА 27. ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ТЕПЛА И ТЕМПЕРАТУРЫ

Теплота и температура (457). Описание температуры и количества тепла (458). Поиски подходящего способа измерения теплоты (459). Единицы количества тепла (460). Скрытая теплота (464). Теплота и энергия (466). Термометры и температура (467). Простые термометры и шкала Цельсия (468). Газовый термометр (472). Применение газового термометра (473). Абсолютная температура. Абсолютный нуль (474). Кинетическая теория и газовая температура (477). Общее понятие температуры (477). Интересные температуры (479). Температура — искусственное понятие (482). С термометром на ракете (482).

Единицы мощности (484). Коэффициент полезного действия (к. п. д.) (486). Мощность в человеческой деятельности (487). Единицы мощности (491). Применение тормозного ремня для измерения мощности (493).

Машины (497). Вечные двигатели (498). Потенциальная энергия+кинетическая энергия (498). Теплота как форма энергии (500). «Теплород» (501). Доказательство Румфорда (503). 1840—1860 годы. Доказательство (504). Термодинамика (519). Физика XIX века (520). «Опыты Джоуля» в лаборатории (521).

Скорость молекул и температура (523). Скорости молекул (524). Равномерное распределение энергии (528). Масса молекул (529). Удельная теплоемкость газов (533). Удельная теплоемкость твердых тел (536). Каков диаметр молекулы? (538). Размер молекул воздуха; непосредственные оценки (539). Средний свободный пробег и давление (544). Диаметр молекулы. Соотношение $\pi d^2 L = D^3$ (544). Вычисление случайных блужданий («путь пьяницы») (544). Число молекул. Число Авогадро (549). Масса молекулы (550). Молекулы и температура (551). Разделение изотопов урана (551). Вакуумные насосы и барометры (552). Теория реальных газов (555). Разумное применение теории (556). Можно ли сжать газ до жидкости? (557). Закон Бойля и CO_2 (558). Жидкость и пар (560). Испарение (561). Насыщенный пар (562). Что создает хорошее самочувствие (562). Кипение (563). Средний свободный пробег и зеркало (565). Кинетическая температура и кинетическая теория (566). Низкие температуры. Жидкий воздух (567). Высокие температуры. Ионы в газах (567). Вязкость (внутреннее трение в газах) (574). «Модель», иллюстрирующая внутреннее трение в газе (576).

ГЛАВА 31. ТОЧНЫЙ ЯЗЫК, СТЕНОГРАФИЧЕСКАЯ МАШИНА И «БЛЕСТЯЩИЙ КАНЦЛЕР» НАУКИ. НОВАЯ НАУКА И НОВЫЕ ВЗГЛЯДЫ

583

Математика — язык науки (583). Математика — верный слуга (584). Математика — умный слуга (588). Теория относительности (591). Галилеево преобразование координат (595). Скорость движущегося тела (597). Абсолютное движение? (598). Преобразования Лоренца (599). Измерение скорости движения в пространстве (599). Аберрация звездного света (601). Опыт Майкельсона — Морли (604). Применение преобразований Лоренца (613). Измерительные линейки и часы (617). Изменение массы (617). Смысл изменения массы (621). Максимальная скорость c (622). Релятивистское сложение скоростей (622). Скорость света (625). Энергия (625). Ковариантность (628). «Незаконный вопрос» (628). Одновременность (628). Причина и следствие (632). Преобразования Лоренца как вращения (636). Инвариантный «интервал» между двумя событиями (637). Существует ли система отсчета, связанная с неподвижным пространством? (637). Высшая ценность математики как языка науки. Математическая форма и красота (638). Геометрия и наука: истина и общая теория относительности (639). Эйнштейновский принцип эквивалентности (640). Локальное ускорение $\equiv$ гравитация (поле силы тяжести) (641). Общая теория относительности и геометрия (643). Новая математика в ядерной физике (646).

Эрик Роджерс
ФИЗИКА
ДЛЯ ЛЮБОЗНАТЕЛЬНЫХ
Том 2

Редактор *Л. В. ГЕССЕН*
Художник *Г. А. Щетинин*
Художественный редактор *П. Ф. Некунда*
Технический редактор *М. П. Грибова*
Корректоры *К. Г. Кривда* и *В. С. Соколов*

Сдано в производство 15/X 1969 г.
Подписано к печати 3/IV 1970 г.
Бумага № 2 60×84¹/₁₆ = 20,5 бум. л.
38,13 усл. печ. л. Уч.-изд. л. 38,07
Изл. № 2/5189
Цена 2 р. 47 к. Зак. 418

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
Москва, 1-й Рижский пер., 2
Ордена Трудового Красного Знамени
Первая Образцовая типография
имени А. А. Жданова
Главполиграфпрома Комитета по печати
при Совете Министров СССР
Москва, М-54, Валовая, 28

ЭРИК РОДЖЕРС

„Физика для любознательных“ т. 1

СОДЕРЖАНИЕ

Часть первая. Материя. Движение. Сила.

Глава 1. Земное тяготение.

Глава 2. Полет снарядов. Геометрическое сложение: векторы

Глава 3. Силы — это векторы

Глава 4. Ваши собственные исследования

Глава 5. Связь между напряжением и деформацией

Глава 6. Поверхностное натяжение: капля и молекулы

Глава 7. Сила и движение

Глава 8. Столкновения. Количество движения

Глава 9. Течение жидкостей и газов.

Глава 10. Колебания и волны

Интерлюдия. Приложение по арифметике

Глава 11. Приближенные вычисления, ошибки, пропорции

ГОТОВИТСЯ К ПЕЧАТИ

ЭРИК РОДЖЕРС

„Физика для любознательных“ т. 3

СОДЕРЖАНИЕ

Часть четвертая. Электричество и магнетизм

- Глава 32. Электрические цепи (лабораторные работы)
- Глава 33. Электростатика. Электрические заряды и поля
- Глава 34. Магнетизм
- Глава 35. Химия и электролиз

Часть пятая. Атомы и ядра

- Глава 36. Электроны в электрических полях
- Глава 37. Магнитные силы
- Глава 38. Исследование атомов
- Глава 39. Радиоактивность
- Глава 40. Строение атомов (теория и эксперимент)
- Глава 41. Лабораторные работы по электронике
- Глава 42. Ускорители атомных частиц
- Глава 43. Физика атомного ядра
- Глава 44. Современная физика

2р.47к.



Физическая химия

